

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvirna različica doktorske disertacije.

Prosim, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is an original PDF file of doctoral thesis.

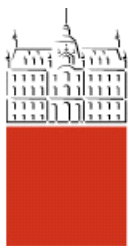
When citing, please refer as follows:

Bombač, M. 2014. Matematično in fizično modeliranje toka v rekah s poplavnimi področji. Doktorska disertacija. = Mathematical and physical modeling of flow in rivers with floodplains. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (Mentor Četina, M., somentor Steinman, F.)

<http://drugg.fgg.uni-lj.si>

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

MARTIN BOMBAČ, univ. dipl. inž. grad.

**MATEMATIČNO IN FIZIČNO MODELIRANJE TOKA V
REKAH S POPLAVNIMI PODROČJI**

Doktorska disertacija štev.: 241

**MATHEMATICAL AND PHYSICAL MODELING OF
FLOW IN RIVERS WITH FLOODPLAINS**

Doctoral thesis No.: 241

Soglasje k temi doktorske disertacije je dala Komisija za doktorski študij UL
na 11. seji 11. septembra 2008.

Za mentorja je bil imenovan prof. dr. Matjaž Četina, za somentorja prof. dr. Franc
Steinman.

Ljubljana, 18. junij 2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- izr. prof. dr. Matjaž Četina,
- prof. dr. Franc Steinman,
- izr. prof. dr. Roman Klasinc, TU Graz, upok.,
- prof. dr. Matjaž Mikoš,
- prof. dr. Rudi Rajar,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 17. redni seji 23. marca 2008.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Renata Jecl, UM FG,
- prof. dr. Matjaž Mikoš,
- izr. prof. dr. Roman Klasinc, TU Graz, upok.,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 4. redni seji 23. oktobra 2013.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik in član,
- prof. dr. Matjaž Četina, mentor,
- prof. dr. Franc Steinman, somentor,
- prof. dr. Renata Jecl, UM FG,
- izr. prof. dr. Roman Klasinc, TU Graz, upok.,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 11. seji 28. maja 2014.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MARTIN BOMBAČ**, univ. dipl. inž. grad., izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom **MATEMATIČNO IN FIZIČNO MODELIRANJE TOKA V REKAH S POPLAVNIMI PODROČJI**.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 18. junij 2014

.....
(podpis)

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 556.5:622.84:556.023(043.3)
Avtor: Martin Bombač, univ. dipl. inž. grad.
Mentor: prof. dr. Matjaž Četina
Somentor: prof. dr. Franc Steinman
Naslov: Matematično in fizično modeliranje toka v rekah s poplavnimi področji
Tip dokumenta: doktorska disertacija
Obseg in oprema: 109 str., 10 pregl., 54 sl., 80 en., 62 pril.
Ključne besede: matematični model, fizični model, poplavno področje, interakcija, turbulenca, ribja steza, PCFLOW2D, $k - \varepsilon$ model turbulence, model Smagorinsky, numerična difuzija

Izvleček

V doktorski disertaciji so obravnavani različni pristopi k modeliranju toka v rekah s poplavnimi področji. Podatki, pridobljeni z meritvami na fizičnem hidravličnem modelu območja reke Save z izrazitimi poplavnimi področji, so služili za podrobno numerično analizo problematike izmenjave vode med tokom v glavni strugi in tokom na poplavnih področjih. Analizirani in dopolnjeni so bili modeli turbulence, vgrajeni v matematični model PCFLOW2D, ki ga že več kot dve desetletji razvijajo in dopolnjujejo na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Z analizo vpliva posameznega člena v dvodimenzijski dinamični časovno povprečeni Navier-Stokesovi (Reynoldsovi) enačbi, ki opisuje globinsko povprečen tok v rekah s poplavnimi področji, je bilo dokazano, da pri gibanju večjih vodnih mas po poplavnih področjih uporaba ustreznega modela turbulence ne igra bistvene vloge, saj je vpliv turbulence možno zadovoljivo zajeti preko trenjskega člena. Zato je bil v nadaljevanju obravnavan primer toka v ribji stezi, kjer je turbulenca zelo izrazita in ima njeno natančno modeliranje velik pomen. Na tem konkretnem primeru je bila opravljena občutljivostna analiza vgrajenega modela turbulence Smagorinsky. Analiza je pokazala, da je za doseg dobrega ujemanja numeričnih rezultatov z meritvami nujno umeriti koeficient Smagorinskega C_s , ki nastopa v modelu turbulence. To je novo dognanje, saj je v vseh nam znanih dosedanjih študijah ter drugih numeričnih programih priporočena vrednost koeficienta C_s enaka (oziroma spremenljiva znotraj zelo majhnega intervala) za vse vrste toka. Naša analiza je pokazala, da je vrednost koeficienta C_s zelo odvisna od uporabljene numerične mreže ter obravnavane vrste toka in lahko močno odstopa od do sedaj priporočenih vrednosti. Z detajlno občutljivostno analizo parametrov matematičnega modela je bil dosežen napredek pri razumevanju obravnavane problematike, kar v bodoče zagotavlja lažje in hitrejše umerjanje matematičnih modelov ter večje zaupanje v dobljene rezultate.

BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 556.5:622.84:556.023(043.3)
Author: Martin Bombač
Supervisor: prof. Matjaž Četina, Ph.D.
Cosupervisor: prof. Franc Steinman, Ph.D.
Title: Mathematical and physical modeling of flow in rivers with floodplains
Document type: Ph.D. Thesis
Scope and tools: 109 pag., 10 tab., 54 fig., 80 eq., 62 ann.
Key Words: mathematical model, physical model, floodplain, interaction, turbulence, fishway, PCFLOW2D, $k - \varepsilon$ turbulence model, Smagorinsky model, numerical diffusion

Abstract

This doctoral thesis discusses various approaches to modeling flow in rivers with floodplains. Measurements on a physical hydraulic model of the Sava River with distinctive floodplains provided noteworthy data which were used for a detailed numerical analysis of the flow interaction between the main channel and floodplains. Turbulence models incorporated into the mathematical model PCFLOW2D, which was developed more than two decades ago and is continuously being improved at the Chair of Fluid Mechanics with Laboratory, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, were precisely analyzed and modified. By analyzing the impact of a single term in a momentum two-dimensional time-averaged Navier-Stokes (Reynolds) equation, which describes the depth-averaged flow, it has been shown that in cases of flows in large water bodies, use of an appropriate turbulence model does not play an essential role because the influence of turbulence can be sufficiently covered through the friction term. Therefore the flow in a vertical slot fishway, where turbulence is very pronounced and its accurate modeling is of great importance was investigated. For this particular case, the sensitivity analysis was carried out for the recently integrated Smagorinsky turbulence model. Analysis has shown that, in order to achieve good agreement of numerical results with measurements, it is necessary to calibrate the Smagorinsky coefficient C_s . This is a new discovery, as to our knowledge all previous studies and other numerical programs recommended an equal value (or within a very small interval) of the coefficient C_s for all types of flow. Our analysis showed that the value of the coefficient C_s is highly dependent on the applied numerical grid and individual type of flow and can significantly deviate from the previous reference values. With the detailed sensitivity analysis of parameters of the mathematical model, progress has been made in understanding the issues addressed, which should in the future allow easier and faster calibration of mathematical models and greater confidence in the obtained results.

ZAHVALA

V prvi vrsti se zahvaljujem mentorju prof. Matjažu Četini, ki me je s svojim bogatim strokovnim znanjem vodil skozi podiplomski študij, katerega rezultat je ta doktorska disertacija. Zahvala gre tudi somentorju prof. Franciju Steinmanu, ki je s skrbnim pregledom in koristnimi napotki pomembno prispeval h kvaliteti pričujočega dela.

Za nesebično pomoč pri uvajanju v zapleten matematični program se iskreno zahvaljujem dr. Mariu Krzyku, saj mi je s tem odprl vrata za nadaljnje delo. Za pomoč pri reševanju na prvi pogled nerešljivih, a s pravim nasvetom enostavnih problemov, povezanih z matematičnim modeliranjem, se zahvaljujem Roku Hamziću in mag. Gašperju Raku.

Posebna zahvala gre sodelavcema na Inštitutu za hidravlične raziskave Primožu Rodiču in dr. Gorazdu Novaku, ki sta mi vsak po svojih najboljših močeh pomagala s svojim znanjem in izkušnjami.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	I
BIBLIOGRAFIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	II
ZAHVALA	III
KAZALO VSEBINE	IV
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
SEZNAM PRILOG	XII
LIST OF TABLES.....	XVI
LIST OF FIGURES.....	XVII
LIST OF ANNEXES	XXI
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XXV
1 UVOD	1
1.1 Opis problematike	3
1.2 Zasnova naloge in pregled poglavij.....	5
2 OSNOVNE ENAČBE, KI OPISUJEJO GIBANJE VODE.....	8
2.1 Sistem osnovnih diferencialnih enačb za tok realne tekočine.....	8
2.2 Enačbe za srednji tok	9
2.3 Modeli turbulence.....	10
2.3.1 Opis turbulence.....	10
2.3.2 Koncepti modelov	12
2.3.3 Koncept turbulentne viskoznosti in difuzije	14
2.3.3.1 Model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti	15
2.3.3.2 Model Smagorinsky	16
2.3.3.3 Model $k - \varepsilon$ (model z dvema transportnima enačbama).....	17
2.4 Enačbe za globinsko povprečni nestalni tok s prosto gladino, uporabljene v programu PCFLOW2D.....	19
2.4.1 Predpostavke.....	19
2.4.2 Osnovne enačbe za globinsko povprečni tok.....	19
2.5 Opis programskega paketa MIKE	20
3 PRIMER TOKA V KANALU ENOSTAVNE OBLIKE	22
3.1 Opis modela in izračunov.....	22
3.2 Izračuni s programom PCFLOW2D.....	23
3.2.1 Začetni in robni pogoji.....	23
3.2.2 Umerjanje modela	24
3.2.3 Rezultati modela in primerjava z meritvami na fizičnem modelu.....	24
3.2.3.1 Koeficient turbulentne viskoznosti.....	25

3.2.3.2	Hitrostni profil.....	27
3.3	Izračuni s programom MIKE.....	31
3.3.1	MIKE21.....	31
3.3.2	MIKE FLOOD	33
4	POVZEMANJE REZULTATOV S FIZIČNEGA MODELA BREŽICE	35
4.1	Opis modela	35
4.2	Modelno merilo.....	37
4.3	Merilni sistem	37
4.4	Umerjanje modela	39
4.5	Rezultati raziskav	40
4.5.1	Raziskave polnjenja retenzijskih prostorov, raziskava poti po retenzijskih površinah in toka z retenzijskih površin v strugo Save	40
4.5.2	Raziskave toka vode po retenzijskih površinah za skupni pretok 3000 m ³ /s.....	41
4.5.3	Raziskave toka vode po retenzijskih površinah za skupni pretok 4000 m ³ /s.....	42
4.5.4	Raziskave toka vode po retenzijskih površinah za skupni pretok 5000 m ³ /s.....	42
4.5.5	Ugotovitve pri raziskavi toka vode po poplavnih področjih	43
5	MATEMATIČNI MODEL BREŽICE	44
5.1	Opis modela in računski detajli	44
5.2	Začetni in robni pogoji.....	45
5.3	Umerjanje modela	46
5.3.1	Občutljivostna analiza modela na vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti n_g	46
5.3.2	Rezultati umerjanja	50
5.3.3	Občutljivostna analiza vrednosti kinematičnega koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t	53
5.4	Rezultati modela in primerjava z meritvami na fizičnem modelu.....	54
5.4.1	Primerjava rezultatov različnih modelov turbulence	54
5.4.2	Vpliv posameznih členov v dinamični enačbi	55
5.4.3	Vodne poti po retenzijskih površinah in izvrednotenje pretokov.....	62
5.4.3.1	Tok vode po retenzijskih površinah pri pretoku 2466 m ³ /s.....	65
5.4.3.2	Tok vode po retenzijskih površinah pri pretoku 3000 m ³ /s.....	66
5.4.3.3	Tok vode po retenzijskih površinah pri pretoku 4000 m ³ /s.....	67
5.4.3.4	Tok vode po retenzijskih površinah pri pretoku 5000 m ³ /s.....	68
5.4.3.5	Primerjava izračunane tokovne slike in pretokov z rezultati fizičnega modela	69
5.5	Zaključki glede uporabe 2D matematičnega modela pri modeliranju toka na modelu Brežice.....	71
6	FIZIČNI MODEL RIBJE STEZE	72
6.1	Splošno.....	72

6.2 Opis modela.....	72
7 MATEMATIČNI MODEL RIBJE STEZE	76
7.1 Opis modela in računski detajli.....	76
7.2 Začetni in robni pogoji	77
7.3 Umerjanje modela	77
7.4 Rezultati in primerjava z meritvami na fizičnem modelu	77
7.4.1 Vpliv koeficienta hrapavosti.....	77
7.4.2 Občutljivostna analiza vpliva velikosti numerične mreže	78
7.4.3 Primerjava med uporabljenimi modeli turbulence	80
7.4.3.1 Uporaba $k - \varepsilon$ modela turbulence za določanje disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna E	86
7.4.3.2 Model turbulence Smagorinsky	88
7.4.4 Vpliv posameznih členov v dinamični enačbi	92
7.5 Analiza različnih geometrij prekatov ribje steze	94
8 ZAKLJUČKI	98
9 NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO.....	102
LITERATURA	103

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1:	Empirične konstante pri globinsko povprečnem $k - \varepsilon$ modelu turbulence.	18
Preglednica 3.1:	Analizirani pretoki in globine vode v sestavljenem kanalu.	23
Preglednica 3.2:	Izračunane hitrosti vode v sestavljenem kanalu.	29
Preglednica 5.1:	Vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti n_g za umerjen matematični model Brežice.	51
Preglednica 5.2:	Prikaz izračunane razdelitve pretoka med strugo Save in poplavnimi področji v izbranih značilnih prečnih profilih pri visokovodnih pretokih.	63
Preglednica 5.3:	Modelirano območje HE Brežice – pregled izvršenih računov s predstavljenimi rezultati.	65
Preglednica 5.4:	Primerjava izračunanih (matematični model) in izmerjenih (fizični model) pretokov po poplavnih površinah in v strugi v izbranih značilnih prečnih profilih pri visokovodnih pretokih.	70
Preglednica 7.1:	Numerične mreže, uporabljene v izračunih.	79
Preglednica 7.2:	Primerjava maksimalnih hitrosti v_{\max} in stopnje disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna E za različne velikosti in položaje manjšega rebra.	95
Preglednica 8.1:	Primerjava povprečnih vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$, izračunanih s $k - \varepsilon$ modelom turbulence ter pripadajočih umerjenih vrednosti koeficienta Smagorinsky C_s za primere, obravnavane v tej disertaciji.	100

KAZALO SLIK

Slika 1.1:	Umetnost in znanost hidravličnega modeliranja rek (povzeto po Knight, 2013, str. 5).	1
Slika 1.2:	Poplavljanje reke Save pred Hrvaško mejo 19. 9. 2010 (foto: N. Pogačnik).	2
Slika 1.3:	Tok vode v meandrirajoči strugi s poplavnimi področji (povzeto po Bousmar, 2002, str. 4).	3
Slika 2.1:	Hidravlični prikaz interakcije na prehodu vode iz struge na poplavno področje (povzeto po Knight, Demetriou in Hamed, 1983, str. 141).	12
Slika 2.2:	Stopnja modeliranja za različne tipe modelov turbulence (povzeto po Sodja, 2007, str. 6).	14
Slika 3.1:	Prečni prerez obravnavanega asimetričnega sestavljenega kanala.	22
Slika 3.2:	Vzdolžna komponenta hitrosti v v prečnem prerezu sestavljenega kanala s poplavno površino pri različnih stacionažah.	24
Slika 3.3:	Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, v prečnem prerezu kanala s poplavno površino ob uporabi različnih modelov turbulence; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti, model Smagorinsky in $k-\varepsilon$ model turbulence.	26
Slika 3.4:	Odvisnost povprečne vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$, izračunane s $k-\varepsilon$ modelom turbulence, pomnožene s 1000, ter pripadajoče umerjene vrednosti koeficienta Smagorinsky C_s od pretoka.	27
Slika 3.5:	Primerjava z različnimi modeli turbulence izračunanih in izmerjenih vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v v prečnem prerezu kanala s poplavno površino pri različnih pretokih.	28
Slika 3.6:	Analiza ujemanja z različnimi modeli turbulence izračunanih in izmerjenih vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v po metodi absolutnih razlik v prečnem prerezu kanala s poplavno površino pri različnih pretokih.	30
Slika 3.7:	Primerjava med rezultati izračunov z matematičnima modeloma PCFLOW2D in MIKE 21. Prikazane so izračunane in izmerjene vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v v prečnem prerezu kanala s poplavno površino pri različnih pretokih.	32
Slika 3.8:	Z modelom MIKE FLOOD izračunana vzdolžna komponenta hitrosti v v prečnem prerezu sestavljenega kanala s poplavno površino v stacionaži $y = 15$ m.	34
Slika 4.1:	Digitalni ortofoto posnetek modeliranega vplivnega območja HE Brežice na fizičnem hidravličnem modelu.	36
Slika 4.2:	Shematski prikaz fizičnega hidravličnega modela območja HE Brežice.	36
Slika 4.3:	Trikotni Thompsonov merilni jez.	38
Slika 4.4:	Ostna merila za meritve gladin na fizičnem hidravličnem modelu.	38

Slika 5.1:	Plastnice obravnavanega območja HE Brežice, uporabljene v matematičnem modelu.	44
Slika 5.2:	Razdelitev računskega območja modela HE Brežice na skupine računskih točk z različnimi atributi.	45
Slika 5.3:	Prikaz razlik v gladini vode pri spremembi vrednosti Manningovega koeficienta n_g v strugi iz $0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ na $0,030 \text{ sm}^{-1/3}$.	47
Slika 5.4:	Prikaz razlik v gladini vode pri spremembi vrednosti Manningovega koeficienta n_g na poplavnih področjih iz $0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ na $0,028 \text{ sm}^{-1/3}$.	48
Slika 5.5:	Vpliv vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti na poplavnih področjih na potek gladin v strugi vzdolž matematičnega modela pri pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	49
Slika 5.6:	Prikaz razlik v gladini vode pri spremembi vrednosti Manningovega koeficienta n_g na poplavnih področjih s povečano hrapavostjo iz $0,028 \text{ sm}^{-1/3}$ na $0,058 \text{ sm}^{-1/3}$.	50
Slika 5.7:	Prostorska porazdelitev vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti n_g za umerjen matematični model Brežice.	52
Slika 5.8:	Prikaz razlik med izračunanimi gladinami z matematičnim modelom PCFLOW2D in izmerjenimi gladinami na fizičnem modelu.	53
Slika 5.9:	Vpliv vrednosti koeficienta kinematične turbulentne viskoznosti ν_t na potek gladin v strugi vzdolž umerjenega matematičnega modela pri pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	54
Slika 5.10:	Kontrolni volumen za iz vrednotenje dinamičnih enačb v x in y smeri.	56
Slika 5.11:	Situacijski prikaz izbranih značilnih prečnih prereзов za iz vrednotenje pretokov v glavni strugi in po poplavnih površinah.	62
Slika 5.12:	(a) hitrostni profil in (b) kote gladine v območju struge v prečnem prerezu 4 za pretoke $2466, 3000, 4000$ in $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.	64
Slika 6.1:	Geometrija ribje steze Blanca v naravnem merilu: (a) tloris in (b) detajli prekata. Dimenzije so v metrih.	73
Slika 6.2:	(a) vtočni objekt ribje steze Blanca v naravi in (b) fizični model ribje steze Blanca v steklenem merilnem žlebu.	74
Slika 6.3:	Meritve na fizičnem modelu ribje steze (a) meritve gladin z ostnim merilom in (b) meritve hitrosti z ADV sondo.	75
Slika 6.4:	Prečni profili v srednjem prekatu ribje steze, kjer so bile merjene hitrosti vode.	75
Slika 7.1:	Numerične mreže v srednjem prekatu ribje steze, uporabljene v izračunih. $M1 = 5,0 \times 5,0 \text{ cm}$; $M2 = 2,5 \times 2,5 \text{ cm}$; $M3 = 1,0 \times 1,0 \text{ cm}$.	76
Slika 7.2:	Izračunana vzdolžna komponenta hitrosti u (m/s) v prečnem profilu $x = 2,3 \text{ m}$ za različne vrednosti n_g .	78
Slika 7.3:	Tokovnice v srednjem prekatu ribje steze, izračunane s $k-\epsilon$ modelom turbulence ob uporabi različnih velikosti numeričnih mrež. (a) mreža $5,0 \times 5,0 \text{ cm}$, (b) mreža $2,5 \times 2,5 \text{ cm}$, (c) mreža $1,0 \times 1,0 \text{ cm}$.	79
Slika 7.4:	Razmerje numerične difuzije in turbulentne viskoznosti VISRAZ pri uporabi $k-\epsilon$ modela turbulence. (a) mreža $5,0 \times 5,0 \text{ cm}$, (b) mreža $2,5 \times 2,5 \text{ cm}$, (c) mreža $1,0 \times 1,0 \text{ cm}$.	80

Slika 7.5:	Hitrostno polje v srednjem prekatu ribje steze Blanca. $k - \varepsilon$ model turbulence; mreža 1 x 1 cm; $\Delta t = 0,1$ s.	81
Slika 7.6:	Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, izračunana s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. Mreža 1 x 1 cm; $\Delta t = 0,1$ s.	81
Slika 7.7:	Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, izračunana s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. (a) mreža 5,0 x 5,0 cm; $\bar{\nu}_t = 8,613 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, (b) mreža 2,5 x 2,5 cm; $\bar{\nu}_t = 7,924 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, (c) mreža 1,0 x 1,0 cm; $\bar{\nu}_t = 7,324 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.	82
Slika 7.8:	Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, za (a) model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti ($\nu_t = 0,007324 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) model Smagorinsky ($C_s = 7,32$) in (c) $k - \varepsilon$ model turbulence. V vseh primerih je uporabljena mreža 1 x 1 cm.	83
Slika 7.9:	Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnih prerezih $x = 0,6, 1,2, 1,8$ in $2,3$ m. (a), (c), (e), (g) komponenta hitrosti u in (b), (d), (f), (h) komponenta hitrosti v .	84
Slika 7.10:	Izračunane izotahe v srednjem prekatu ribje steze. (a) model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti ($\nu_t = 0,007324 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) model Smagorinsky ($C_s = 7,32$) in (c) $k - \varepsilon$ model turbulence. V vseh primerih je uporabljena mreža 1 x 1 cm.	85
Slika 7.11:	Tokovnice za (a) model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti ($\nu_t = 0,007234 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) model Smagorinsky ($C_s = 7,32$) in (c) $k - \varepsilon$ model. V vseh primerih je uporabljena mreža 1 x 1 cm.	85
Slika 7.12:	(a) turbulentna kinetična energija na enoto mase k (m^2/s^2) in (b) disipacija turbulentne kinetične energije na enoto mase ε (m^2/s^3), izračunani s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. Mreža 1 x 1 cm; $\Delta t = 0,1$ s.	87
Slika 7.13:	Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, izračunana z modelom turbulence Smagorinsky ($C_s = 0,17$). (a) mreža 5,0 x 5,0 cm; $\bar{\nu}_t = 1,28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, (b) mreža 2,5 x 2,5 cm; $\bar{\nu}_t = 0,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, (c) mreža 1,0 x 1,0 cm; $\bar{\nu}_t = 0,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.	89
Slika 7.14:	Odvisnost izračunane povprečne vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$, pomnožena s 1000, od vrednosti koeficienta Smagorinsky C_s za tri različno goste numerične mreže.	89
Slika 7.15:	Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, za (a) model Smagorinsky $C_s = 0,17$, (b) model Smagorinsky $C_s = 7,32$ in (c) $k - \varepsilon$ model. V vseh primerih je uporabljena numerična mreža 1 x 1 cm.	90
Slika 7.16:	Tokovnice za (a) model Smagorinsky $C_s = 0,17$, (b) model Smagorinsky $C_s = 7,32$ in (c) $k - \varepsilon$ model. V vseh primerih je uporabljena numerična mreža 1 x 1 cm.	90

Slika 7.17:	Izotahe v srednjem prekatu ribje steze. (a) model Smagorinsky $C_s = 0,17$, (b) model Smagorinsky $C_s = 7,32$ in (c) $k-\varepsilon$ model. V vseh primerih je uporabljena numerična mreža 1×1 cm.	91
Slika 7.18:	Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnem prerezu $x = 1,8$ m. (a) komponenta hitrosti u in (b) komponenta hitrosti v .	91
Slika 7.19:	Prostorska razporeditev disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna E (W/m^3) za različne oblike in položaje manjšega rebra. Krajše rebro (a) do (c); daljše rebro (d) do (f).	94
Slika 7.20:	Izotahe v srednjem prekatu ribje steze za različne oblike in položaje manjšega rebra. Krajše rebro (a) do (c); daljše rebro (d) do (f). $k-\varepsilon$ model turbulence; numerična mreža 1×1 cm.	96
Slika 7.21:	Tokovnice v srednjem prekatu ribje steze za različne oblike in položaje manjšega rebra. Krajše rebro (a) do (c); daljše rebro (d) do (f). $k-\varepsilon$ model turbulence; numerična mreža 1×1 cm.	97

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga A.1:	Obravnavano območje odseka Save med Krškim in Brežicami s pripadajočimi poplavnimi območji na distorziranem fizičnem hidravličnem modelu HE Brežice.	A1
Priloga A.2:	Distorzirani hidravlični model HE Brežice v merilu 1:125/62,5 na Inštitutu za hidravlične raziskave v Ljubljani.	A2
Priloga A.3:	Tabela s podatki terenskih meritev nivojev gladin, meritev na umerjenem modelu ter medsebojna primerjava za pretoke 1230 m ³ /s (12. 12. 2008), 1595 m ³ /s (31. 3. 2009) in 2466 m ³ /s (19. 9. 2007).	A3
Priloga A.4:	Grafični prikaz poteka izmerjenih gladin v naravi in na umerjenem modelu za pretoke 1230 m ³ /s (12. 12. 2008), 1595 m ³ /s (31. 3. 2009) in 2466 m ³ /s (19. 9. 2007).	A4
Priloga A.5:	Grafični prikaz razlik med meritvami nivojev gladin v naravi in na umerjenem modelu v posameznih piezometrih za pretoke 1230 m ³ /s (12. 12. 2008), 1595 m ³ /s (31. 3. 2009) in 2466 m ³ /s (19. 9. 2007).	A5
Priloga A.6:	Rezultati meritev nivojev gladin na umerjenem modelu za pretoke 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s in 5000 m ³ /s.	A6
Priloga A.7:	Grafični prikaz poteka gladin na umerjenem modelu za pretoke 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s (s primerjavo z meritvami 2. 11. 1990) in 5000 m ³ /s.	A7
Priloga A.8:	Potek poti vode po poplavnih področjih za skupni pretok 3000 m ³ /s.	A8
Priloga A.9:	Potek poti vode po poplavnih področjih za skupni pretok 4000 m ³ /s.	A9
Priloga A.10:	Potek poti vode po poplavnih področjih za skupni pretok 5000 m ³ /s.	A10
Priloga A.11:	Tabela s podatki razdelitve pretokov na levi in desni poplavni površini ter strugo za pretoke 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s in 5000 m ³ /s.	A11
Priloga A.12:	Pretok 3000 m ³ /s na distorziranem hidravličnem modelu HE Brežice s prikazanimi obarvanimi potmi vode po poplavnih površinah.	A12
Priloga A.13:	Pretok 4000 m ³ /s na distorziranem hidravličnem modelu HE Brežice s prikazanimi obarvanimi potmi vode po poplavnih površinah.	A13
Priloga A.14:	Pretok 5000 m ³ /s na distorziranem hidravličnem modelu HE Brežice s prikazanimi obarvanimi potmi vode po poplavnih površinah.	A14

PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga B.1:	Plastnice obravnavanega območja HE Brežice, uporabljene v matematičnem modelu.	B1
--------------	--	----

Priloga B.2:	Vzdolžni potek gladin na umerjenem matematičnem modelu Brežice s prikazanimi meritvami na fizičnem modelu.	B2
Priloga B.3:	Tabela izračunanih nivojev gladin v strugi Save z umerjenim matematičnim modelom, meritev na fizičnem modelu ter medsebojna primerjava za pretoke 1230 m ³ /s (12. 12. 2008), 1595 m ³ /s (31. 3. 2009), 2466 m ³ /s (19. 9. 2007), 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s (2. 11. 1990) in 5000 m ³ /s.	B3
Priloga B.4:	Tabela izračunanih nivojev gladin z umerjenim matematičnim modelom, meritev na fizičnem modelu ter medsebojna primerjava za pretoke 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s (2. 11. 1990) in 5000 m ³ /s.	B4
Priloga B.5:	Hitrostno polje na umerjenem matematičnem modelu pri skupnem pretoku $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B5
Priloga B.6:	Obseg poplavnih področij s povečano hrapavostjo.	B6
Priloga B.7:	Prostorska razporeditev koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, pri skupnem pretoku $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$; model konstantne turbulentne viskoznosti.	B7
Priloga B.8:	Prostorska razporeditev koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t \times 1000$ pri skupnem pretoku $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$; model Smagorinsky; $C_s = 0,17$.	B8
Priloga B.9:	Prostorska razporeditev koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t \times 1000$ pri skupnem pretoku $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$; $k - \varepsilon$ model turbulence.	B9
Priloga B.10:	Vpliv 0. člena v dinamični enačbi (smer y) po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m ³ /s; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B10
Priloga B.11:	Vpliv 1. člena v dinamični enačbi (smer y) po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m ³ /s; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B11
Priloga B.12:	Vpliv 2. člena v dinamični enačbi (smer y) po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m ³ /s; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B12
Priloga B.13:	Vpliv 3. člena v dinamični enačbi (smer y) po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m ³ /s; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B13
Priloga B.14:	Vpliv 4. člena v dinamični enačbi (smer y) po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m ³ /s; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B14
Priloga B.15:	Vpliv 5. člena v dinamični enačbi (smer y) po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m ³ /s; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B15
Priloga B.16:	Vpliv 6. člena v dinamični enačbi (smer y) po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m ³ /s; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B16

Priloga B.17:	Vpliv 7. člena v dinamični enačbi (smer y) po 10 urah simulacije. Skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B17
Priloga B.18:	Vpliv 0. člena v dinamični enačbi (smer x) po 10 urah simulacije. Skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B18
Priloga B.19:	Vpliv 1. člena v dinamični enačbi (smer x) po 10 urah simulacije. Skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B19
Priloga B.20:	Vpliv 2. člena v dinamični enačbi (smer x) po 10 urah simulacije. Skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B20
Priloga B.21:	Vpliv 3. člena v dinamični enačbi (smer x) po 10 urah simulacije. Skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B21
Priloga B.22:	Vpliv 4. člena v dinamični enačbi (smer x) po 10 urah simulacije. Skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B22
Priloga B.23:	Vpliv 5. člena v dinamični enačbi (smer x) po 10 urah simulacije. Skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B23
Priloga B.24:	Vpliv 6. člena v dinamični enačbi (smer x) po 10 urah simulacije. Skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B24
Priloga B.25:	Vpliv 7. člena v dinamični enačbi (smer x) po 10 urah simulacije. Skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B25
Priloga B.26:	Tokovnice pri skupnem pretoku $2466 \text{ m}^3/\text{s}$.	B26
Priloga B.27:	Tokovnice pri skupnem pretoku $3000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B27
Priloga B.28:	Tokovnice pri skupnem pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B28
Priloga B.29:	Tokovnice pri skupnem pretoku $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B29
Priloga B.30:	Obseg poplavljenosti s prikazom globin vode in vektorji hitrosti pri skupnem pretoku $2466 \text{ m}^3/\text{s}$.	B30
Priloga B.31:	Obseg poplavljenosti s prikazom globin vode in vektorji hitrosti pri skupnem pretoku $3000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B31
Priloga B.32:	Obseg poplavljenosti s prikazom globin vode in vektorji hitrosti pri skupnem pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B32
Priloga B.33:	Obseg poplavljenosti s prikazom globin vode in vektorji hitrosti pri skupnem pretoku $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B33
Priloga B.34:	Izotahe pri skupnem pretoku $2466 \text{ m}^3/\text{s}$.	B34
Priloga B.35:	Izotahe pri skupnem pretoku $3000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B35
Priloga B.36:	Izotahe pri skupnem pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B36

Priloga B.37:	Izotahe pri skupnem pretoku 5000 m ³ /s.	B37
Priloga B.38:	Primerjava tokovnic, dobljenih na matematičnem in fizičnem modelu pri skupnem pretoku 3000 m ³ /s.	B38
Priloga B.39:	Primerjava tokovnic, dobljenih na matematičnem in fizičnem modelu pri skupnem pretoku 4000 m ³ /s.	B39
Priloga B.40:	Primerjava tokovnic, dobljenih na matematičnem in fizičnem modelu pri skupnem pretoku 5000 m ³ /s.	B40

PRILOGA C: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA RIBJE STEZE BLANCA

Priloga C.1:	Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnih prerezih $x = 0,6, 1,2, 1,8$ and $2,3$ m; model konstantne efektivne viskoznosti.	C1
Priloga C.2:	Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnih prerezih $x = 0,6, 1,2, 1,8$ and $2,3$ m; model turbulence Smagorinsky.	C2
Priloga C.3:	Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnih prerezih $x = 0,6, 1,2, 1,8$ and $2,3$ m; $k - \varepsilon$ model turbulence.	C3
Priloga C.4:	Tok vode v srednjem prekatu ribje steze; model konstantne efektivne viskoznosti.	C4
Priloga C.5:	Tok vode v srednjem prekatu ribje steze; model turbulence Smagorinsky.	C5
Priloga C.6:	Tok vode v srednjem prekatu ribje steze; $k - \varepsilon$ model turbulence.	C6
Priloga C.7:	Vpliv posameznih členov v dinamični enačbi (smer x) v karakterističnem srednjem prekatu ribje steze po eni uri simulacije. $k - \varepsilon$ model turbulence.	C7
Priloga C.8:	Vpliv posameznih členov v dinamični enačbi (smer y) v karakterističnem srednjem prekatu ribje steze po eni uri simulacije. $k - \varepsilon$ model turbulence.	C8

LIST OF TABLES

Table 2.1:	Empirical constants for the depth-averaged $k - \varepsilon$ turbulence model for shallow water flows.	18
Table 3.1:	Analyzed discharges and water depths in the compound channel.	23
Table 3.2:	Calculated flow velocities in the compound channel.	29
Table 5.1:	Manning roughness coefficient values for the calibrated mathematical model Brežice.	51
Table 5.2:	Calculated discharge distribution between the Sava main channel and floodplains in the selected characteristic cross-sections for different flood discharges.	63
Table 5.3:	Modeled area of HPP Brežice - review of the performed simulations with presented results.	65
Table 5.4:	Comparison of the calculated (mathematical model) and measured (physical model) discharges on the floodplains and in the main channel in the selected characteristic cross-sections for different flood discharges.	70
Table 7.1:	Characteristics of numerical meshes used for mathematical modelling.	79
Table 7.2:	Comparison of maximum velocities v_{\max} and energy dissipation rate per unit volume E for various sizes and positions of small baffles.	95
Table 8.1:	Comparison of the average values of the eddy viscosity $\bar{\nu}_t$ calculated with the $k - \varepsilon$ turbulence model and related calibrated values of the Smagorinsky coefficient C_s for examples discussed in this thesis.	100

LIST OF FIGURES

Figure 1.1:	The art and science of river engineering (adapted from Knight, 2013, p. 5).	1
Figure 1.2:	Flooding of the Sava River before the Croatian border 19. 9. 2010 (Photo: N. Pogačnik).	2
Figure 1.3:	Flow structure in a meandering compound channel (adapted from Bousmar, 2002, p. 4).	3
Figure 2.1:	Hydraulic aspects of overbank flow (adapted from Knight, Demetriou and Hamed, 1983, p. 141).	12
Figure 2.2:	The level of modeling for different types of turbulence models (adapted from Sodja, 2007, p. 6).	14
Figure 3.1:	Cross section of the asymmetric compound channel.	22
Figure 3.2:	Longitudinal velocity component v in the cross section of the asymmetric compound channel at different stationing.	24
Figure 3.3:	Values of eddy viscosity coefficient ν_t , multiplied by 1000, in the cross section of the asymmetric compound channel, using different turbulence models; constant viscosity model, Smagorinsky model and $k - \varepsilon$ model.	26
Figure 3.4:	The dependence of the average value of the eddy viscosity $\bar{\nu}_t$ calculated with the $k - \varepsilon$ turbulence model, multiplied by 1000, and the corresponding calibrated values of the Smagorinsky coefficient C_s on the discharge.	27
Figure 3.5:	Comparison of calculated (using different turbulence models) and measured values of the longitudinal velocity component v at the compound channel cross-section at different discharges.	28
Figure 3.6:	Matching analysis of the calculated (using different turbulence models) and measured values of the longitudinal velocity component v with the method of absolute differences at compound channel cross-section at different discharges.	30
Figure 3.7:	Comparison between the results of calculations with mathematical models PCFLOW2D and MIKE 21. Calculated and measured values of the longitudinal velocity component v at compound channel cross-section at different discharges are shown.	33
Figure 3.8:	Longitudinal velocity component v in the cross section of the asymmetric compound channel at station $y = 15$ m calculated with mathematical model MIKE FLOOD.	34
Figure 4.1:	Digital satellite image of modeled area of HPP Brežice on the physical hydraulic model.	36
Figure 4.2:	Schematic diagram of the physical hydraulic model of the area of HPP Brežice.	36
Figure 4.3:	A triangular Thompson's measuring thin-plate weir.	38
Figure 4.4:	Water level measurements on a physical hydraulic model.	38
Figure 5.1:	Bathymetry of the HPP Brežice area used in the mathematical model.	44

Figure 5.2:	Distribution of the computational domain of the HPP Brežice model on numerical point groups with different attributes.	45
Figure 5.3:	Display of differences between water levels after changing the value of the Manning coefficient n_g in the main channel from $0.035 \text{ sm}^{-1/3}$ to $0.030 \text{ sm}^{-1/3}$.	47
Figure 5.4:	Display of differences between water levels after changing the value of the Manning coefficient n_g on the flood plains from $0.035 \text{ sm}^{-1/3}$ to $0.028 \text{ sm}^{-1/3}$.	48
Figure 5.5:	Impact of Manning roughness coefficient on the flood plains on water levels in the main channel along the mathematical model for the discharge of $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	49
Figure 5.6:	Display of differences between water levels after changing of value of the Manning coefficient n_g on the additionally roughened flood plains from $0.028 \text{ sm}^{-1/3}$ to $0.058 \text{ sm}^{-1/3}$.	50
Figure 5.7:	Spatial distribution of the Manning roughness coefficient values for the calibrated mathematical model Brežice.	52
Figure 5.8:	Display of differences between the calculated water levels with the mathematical model PCFLOW2D and the measured water levels on the physical model.	53
Figure 5.9:	Impact of kinematic turbulent viscosity coefficient ν_t on water levels in the main channel along the calibrated mathematical model for the discharge of $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	54
Figure 5.10:	Control volume for expressing the dynamic equations in x and y direction.	56
Figure 5.11:	Display of characteristic cross-sections selected for the determination of discharge distribution between the main channel and floodplains.	62
Figure 5.12:	(a) velocity profile and (b) water levels in the main channel in cross-section 4 for discharges $2466, 3000, 4000$ and $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.	64
Figure 6.1:	Prototype geometry of the vertical slot fishway Blanca: (a) plan view, and (b) details of slot and pool. Dimensions in meters.	73
Figure 6.2:	(a) the intake part of vertical slot fishway Blanca and (b) physical model of the vertical slot fishway Blanca in glass flume.	74
Figure 6.3:	Measurements on the physical model of the fishway (a) free surface elevation measurements and (b) velocity measurements with ADV probe.	75
Figure 6.4:	Cross sections in central pool of VSF where velocities were measured.	75
Figure 7.1:	Numerical meshes in central pool of VSF, used for mathematical modelling. $M1 = 5.0 \times 5.0 \text{ cm}$; $M2 = 2.5 \times 2.5 \text{ cm}$; $M3 = 1.0 \times 1.0 \text{ cm}$.	76
Figure 7.2:	Calculated longitudinal velocity u (m/s) at cross section $x = 2.3 \text{ m}$ for various values of n_g .	78
Figure 7.3:	Streamlines, calculated with the $k - \varepsilon$ turbulence model for various cell sizes. (a) $5.0 \times 5.0 \text{ cm}$ cells, (b) $2.5 \times 2.5 \text{ cm}$ cells, (c) $1.0 \times 1.0 \text{ cm}$ cells.	79
Figure 7.4:	Values of the ratio between numerical diffusion and eddy viscosity coefficient ν_t for the $k - \varepsilon$ turbulence model (i.e. VISRAZ values). (a) $5.0 \times 5.0 \text{ cm}$ cells, (b) $2.5 \times 2.5 \text{ cm}$ cells, (c) $1.0 \times 1.0 \text{ cm}$ cells.	80

Figure 7.5:	Velocity field in the central pool of the VSF Blanca. $k - \varepsilon$ turbulence model; mesh 1×1 cm; $\Delta t = 0.1$ s.	81
Figure 7.6:	Values of eddy viscosity ν_t , multiplied by 1000, calculated with the $k - \varepsilon$ turbulence model. Mesh 1×1 cm; $\Delta t = 0.1$ s.	81
Figure 7.7:	Values of eddy viscosity ν_t , multiplied by 1000, calculated with the $k - \varepsilon$ turbulence model. (a) 5.0×5.0 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 8.613 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, (b) 2.5×2.5 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 7.924 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, (c) 1.0×1.0 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 7.324 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.	82
Figure 7.8:	Values of eddy viscosity coefficient ν_t , multiplied by 1000, for (a) constant viscosity model ($\nu_t = 0.007324 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) Smagorinsky model ($C_s = 7.32$) and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases 1×1 cm mesh is used.	83
Figure 7.9:	Calculated and measured velocity components u and v at cross sections $x = 0.6, 1.2, 1.8$ and 2.3 m. (a), (c), (e), (g) velocity component u and (b), (d), (f), (h) velocity component v .	84
Figure 7.10:	Calculated isovels in the middle pool of the fishway. (a) constant viscosity model ($\nu_t = 0.007324 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) Smagorinsky model ($C_s = 7.32$) and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases 1×1 cm mesh is used.	85
Figure 7.11:	Streamlines for (a) constant viscosity model ($\nu_t = 0.007234 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) Smagorinsky model ($C_s = 7.32$) and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases 1×1 cm mesh is used.	85
Figure 7.12:	(a) turbulent kinetic energy per unit mass k (m^2/s^2) and (b) energy dissipation rate per unit mass ε (m^2/s^3), calculated with the $k - \varepsilon$ turbulence model. Mesh 1×1 cm; $\Delta t = 0.1$ s.	87
Figure 7.13:	Values of eddy viscosity ν_t , multiplied by 1000, calculated with the Smagorinsky turbulence model ($C_s = 0.17$). (a) 5.0×5.0 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 1.28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, (b) 2.5×2.5 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 0.36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, (c) 1.0×1.0 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 0.08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.	89
Figure 7.14:	The dependence of the calculated average value of eddy viscosity $\bar{\nu}_t$, multiplied by 1000, on the Smagorinsky coefficient C_s for three different numerical mesh sizes.	89
Figure 7.15:	Values of eddy viscosity coefficient ν_t , multiplied by 1000, for (a) Smagorinsky model $C_s = 0.17$, (b) Smagorinsky model $C_s = 7.32$ and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases 1×1 cm numerical mesh is used.	90
Figure 7.16:	Streamlines for (a) Smagorinsky model $C_s = 0.17$, (b) Smagorinsky model $C_s = 7.32$ and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases 1×1 cm numerical mesh is used.	90
Figure 7.17:	Isovels in the middle pool of the fishway. (a) Smagorinsky model $C_s = 0.17$, (b) Smagorinsky model $C_s = 7.32$ and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases 1×1 cm numerical mesh is used.	91
Figure 7.18:	Calculated and measured velocity components u and v at cross section $x = 1.8$ m. (a) velocity component u and (b) velocity component v .	91

- Figure 7.19: Energy dissipation rate per unit volume E (W/m^3) for various sizes and positions of small baffles. Short baffles (a) to (c); longer baffles (d) to (f). 95
- Figure 7.20: Isovels in the middle pool of the fishway for various sizes and positions of small baffles. Short baffles (a) to (c); longer baffles (d) to (f). $k - \varepsilon$ turbulence model; 1 x 1 cm numerical mesh. 96
- Figure 7.21: Streamlines in the middle pool of the fishway for various sizes and positions of small baffles. Short baffles (a) to (c); longer baffles (d) to (f). $k - \varepsilon$ turbulence mode; 1 x 1 cm numerical mesh. 97

LIST OF ANNEXES

ANNEX A: RESULTS OF THE PHYSICAL MODEL OF THE HPP BREŽICE AREA

Annex A.1:	The Sava river reach between Krško and Brežice with corresponding floodplains in the distorted physical hydraulic model of HPP Brežice.	A1
Annex A.2:	Distorted hydraulic model of the HPP Brežice in scale 1:125 / 62.5 at the Institute for Hydraulic Research in Ljubljana.	A2
Annex A.3:	Table with field measurements of water levels, measurements on a calibrated physical model and comparison for discharges 1230 m ³ /s (12. 12. 2008), 1595 m ³ /s (31. 3. 2009) and 2466 m ³ /s (19. 9. 2007).	A3
Annex A.4:	Graphical display of the measured water levels in nature and on a calibrated physical model for discharges 1230 m ³ /s (12. 12. 2008), 1595 m ³ /s (31. 3. 2009) and 2466 m ³ /s (19. 9. 2007).	A4
Annex A.5:	Graphical display of the differences between measurements of water levels in nature and on a calibrated physical model in individual piezometers for discharges 1230 m ³ /s (12. 12. 2008), 1595 m ³ /s (31. 3. 2009) and 2466 m ³ /s (19. 9. 2007).	A5
Annex A.6:	The results of measurements of water levels on a calibrated physical model for discharges 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s and 5000 m ³ /s.	A6
Annex A.7:	Graphical display of water levels on a calibrated physical model for discharges 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s (by comparison with measurements from 2. 11. 1990) and 5000 m ³ /s.	A7
Annex A.8:	Streamlines in floodplains for the total discharge 3000 m ³ /s.	A8
Annex A.9:	Streamlines in floodplains for the total discharge 4000 m ³ /s.	A9
Annex A.10:	Streamlines in floodplains for the total discharge 5000 m ³ /s.	A10
Annex A.11:	Table of flow distribution between the left and right floodplains and the main channel for discharges 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s and 5000 m ³ /s.	A11
Annex A.12:	Pictures of streamlines on the floodplains taken on a distorted hydraulic model of the HPP Brežice for discharge 3000 m ³ /s.	A12
Annex A.13:	Pictures of streamlines on the floodplains taken on a distorted hydraulic model of the HPP Brežice for discharge 4000 m ³ /s.	A13
Annex A.14:	Pictures of streamlines on the floodplains taken on a distorted hydraulic model of the HPP Brežice for discharge 5000 m ³ /s.	A14

ANNEX B: RESULTS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE HPP BREŽICE AREA

Annex B.1:	Bathymetry of the HPP Brežice area used in the mathematical model.	B1
------------	--	----

Annex B.2:	The longitudinal profile of water elevation on a calibrated mathematical model of the HPP Brežice area with plotted measurements from the physical model.	B2
Annex B.3:	Table of calculated water levels in the main channel of the Sava River with a calibrated mathematical model, measurements on the physical model and comparison between them for discharges 1230 m ³ /s (12. 12. 2008), 1595 m ³ /s (31. 3. 2009), 2466 m ³ /s (19. 9. 2007), 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s (2. 11. 1990) and 5000 m ³ /s.	B3
Annex B.4:	Table of calculated water levels with a calibrated mathematical model, measurements on the physical model and comparison between them for discharges 3000 m ³ /s, 4000 m ³ /s (2. 11. 1990) and 5000 m ³ /s.	B4
Annex B.5:	The velocity field in a calibrated mathematical model for discharge $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	B5
Annex B.6:	Area of additionally roughened floodplains.	B6
Annex B.7:	The spatial distribution of the eddy viscosity coefficient ν_t , multiplied by 1000, for total discharge $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$; constant eddy viscosity model.	B7
Annex B.8:	The spatial distribution of the eddy viscosity coefficient ν_t , multiplied by 1000, for total discharge $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$; Smagorinsky turbulence model; $C_s = 0,17$.	B8
Annex B.9:	The spatial distribution of the eddy viscosity coefficient ν_t , multiplied by 1000, for total discharge $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$; $k - \varepsilon$ turbulence model.	B9
Annex B.10:	Impact of 0 th term in the momentum equation (y direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B10
Annex B.11:	Impact of 1 st term in the momentum equation (y direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B11
Annex B.12:	Impact of 2 nd term in the momentum equation (y direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B12
Annex B.13:	Impact of 3 rd term in the momentum equation (y direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B13
Annex B.14:	Impact of 4 th term in the momentum equation (y direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B14
Annex B.15:	Impact of 5 th term in the momentum equation (y direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B15
Annex B.16:	Impact of 6 th term in the momentum equation (y direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B16

Annex B.17:	Impact of 7 th term in the momentum equation (y direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B17
Annex B.18:	Impact of 0 th term in the momentum equation (x direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B18
Annex B.19:	Impact of 1 st term in the momentum equation (x direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B19
Annex B.20:	Impact of 2 nd term in the momentum equation (x direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B20
Annex B.21:	Impact of 3 rd term in the momentum equation (x direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B21
Annex B.22:	Impact of 4 th term in the momentum equation (x direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B22
Annex B.23:	Impact of 5 th term in the momentum equation (x direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B23
Annex B.24:	Impact of 6 th term in the momentum equation (x direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B24
Annex B.25:	Impact of 7 th term in the momentum equation (x direction) after 10 hours of simulation. Total discharge of 4000 m ³ /s, constant eddy viscosity model $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.	B25
Annex B.26:	Streamlines for the total discharge of 2466 m ³ /s.	B26
Annex B.27:	Streamlines for the total discharge of 3000 m ³ /s.	B27
Annex B.28:	Streamlines for the total discharge of 4000 m ³ /s.	B28
Annex B.29:	Streamlines for the total discharge of 5000 m ³ /s.	B29
Annex B.30:	Showing the extent of flooding, water depth and velocity vectors for the total discharge of 2466 m ³ /s.	B30
Annex B.31:	Showing the extent of flooding, water depth and velocity vectors for the total discharge of 3000 m ³ /s.	B31
Annex B.32:	Showing the extent of flooding, water depth and velocity vectors for the total discharge of 4000 m ³ /s.	B32
Annex B.33:	Showing the extent of flooding, water depth and velocity vectors for the total discharge of 5000 m ³ /s.	B33
Annex B.34:	Isovels for the total discharge of 2466 m ³ /s.	B34
Annex B.35:	Isovels for the total discharge of 3000 m ³ /s.	B35
Annex B.36:	Isovels for the total discharge of 4000 m ³ /s.	B36

Annex B.37:	Isovels for the total discharge of 5000 m ³ /s.	B37
Annex B.38:	Comparison of streamlines obtained with the mathematical and physical models for the total discharge of 3000 m ³ /s.	B38
Annex B.39:	Comparison of streamlines obtained with the mathematical and physical models for the total discharge of 4000 m ³ /s.	B39
Annex B.40:	Comparison of streamlines obtained with the mathematical and physical models for the total discharge of 5000 m ³ /s.	B40

ANNEX C: RESULTS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE VERTICAL SLOT FISHWAY BLANCA

Annex C.1:	Calculated and measured velocity components u and v at cross sections $x = 0.6, 1.2, 1.8$ and 2.3 m; constant eddy viscosity model.	C1
Annex C.2:	Calculated and measured velocity components u and v at cross sections $x = 0.6, 1.2, 1.8$ and 2.3 m; Smagorinsky turbulence model.	C2
Annex C.3:	Calculated and measured velocity components u and v at cross sections $x = 0.6, 1.2, 1.8$ and 2.3 m; $k - \varepsilon$ turbulence model.	C3
Annex C.4:	Velocity field in the central pool of VSF Blanca; constant eddy viscosity model.	C4
Annex C.5:	Velocity field in the central pool of VSF Blanca; Smagorinsky turbulence model.	C5
Annex C.6:	Velocity field in the central pool of VSF Blanca; $k - \varepsilon$ turbulence model.	C6
Annex C.7:	Impact of individual terms in the momentum equation (x direction) in the central pool of VSF Blanca after one hour of simulation. $k - \varepsilon$ turbulence model.	C7
Annex C.8:	Impact of individual terms in the momentum equation (y direction) in the central pool of VSF Blanca after one hour of simulation. $k - \varepsilon$ turbulence model.	C8

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

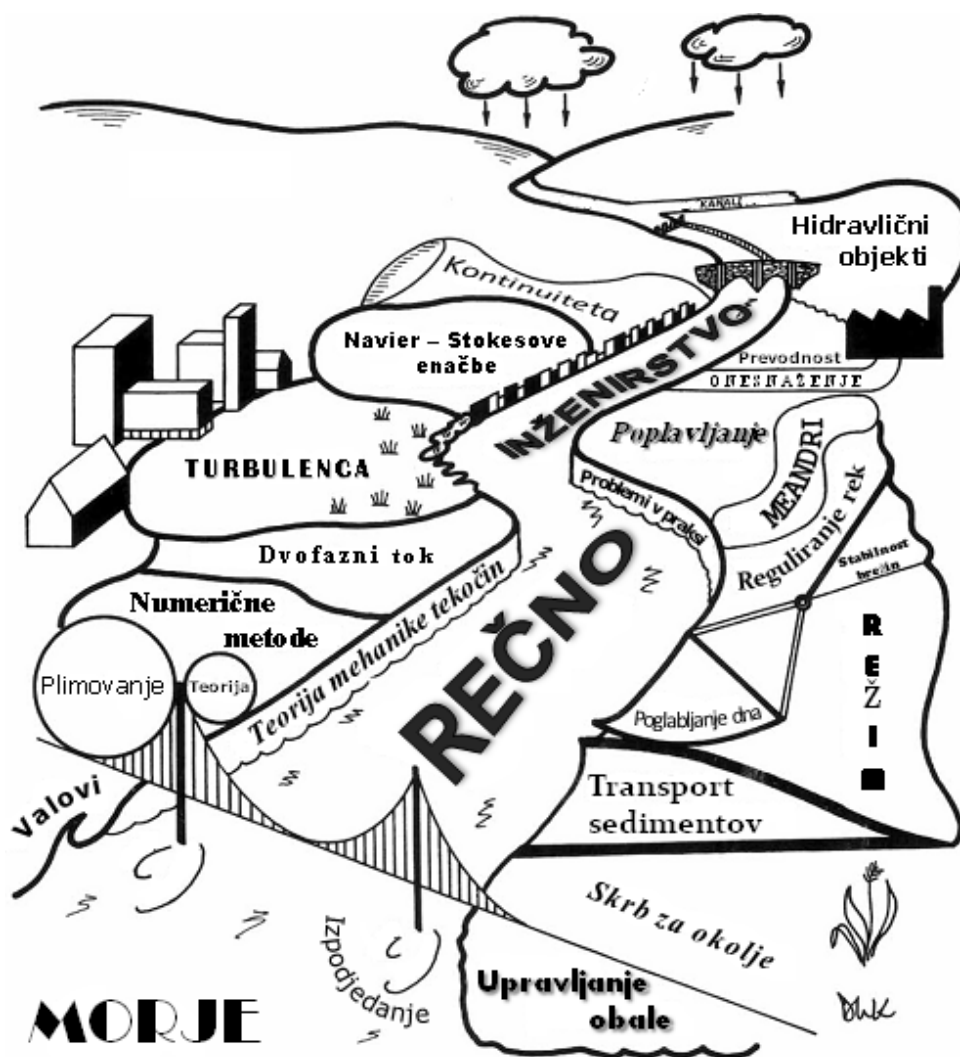
b_0	širina vertikalne reže v ribji stezi [m]
C_s	Smagorinsky-jev empirični koeficient [-]
$C_\mu, C_D, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_k, C_\varepsilon$	empirične konstante v $k - \varepsilon$ modelu turbulence
C_f	koeficient trenja ob dno [-]
d_x, d_y	širina in dolžina manjšega rebra v ribji stezi [m]
E	disipacija turbulentne kinetične energije na enoto volumna [W m^{-3}]
\overline{E}	povprečna vrednost disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna [W m^{-3}]
f_i	volumska sila na enoto mase v koordinatni smeri i [N kg^{-1}]
g	gravitacijski pospešek [m s^{-2}]
h	globina vode [m]
h_f	globina vode na poplavnem področju [m]
h_m	globina vode v glavni strugi [m]
h_{out}	globina vode na spodnjem robu modela (spodnji robni pogoj) [m]
h_r	relativna globina vode na poplavnem področju [-]
H	kota vodne gladine [m n.m.]
k	turbulentna kinetična energija na enoto mase [$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$]
L	dolžina prekata ribje steze [m]
L_m	empirično določeno dolžinsko merilo [m]
n_g	koeficient hrapavosti po Manningu [$\text{s m}^{-1/3}$]
n	faktor distorzije [-]
N_x, N_y	število numeričnih celic v x in y smeri [-]
P	trenutni tlak [N m^{-2}]
P_k	produkcija turbulentne kinetične energije na enoto mase zaradi horizontalnih gradientov hitrosti [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$]
P_{kv}	produkcija turbulentne kinetične energije na enoto mase zaradi trenja ob dno [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$]
$P_{\varepsilon v}$	produkcija disipacije turbulentne kinetične energije na enoto mase zaradi trenja ob dno [$\text{m}^2 \text{s}^{-4}$]
p	časovno povprečna vrednost tlaka [N m^{-2}]
Q	pretok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
Q_f	pretok na poplavnem področju [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
Q_m	pretok v glavni strugi [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
S_0	vzdolžni padec [-]
S_{ij}	tenzor deformacijskih hitrosti [s^{-1}]
S_Φ	izvorni člen skalarja Φ
t	čas [s]
t_{max}	čas trajanja simulacije [s]

U_i	trenutne hitrosti v posameznih koordinatnih smereh i [m s^{-1}]
u	horizontalna hitrost toka v smeri osi x [m s^{-1}]
\bar{u}	globinsko povprečna hitrost u [m s^{-1}]
\bar{u}	povprečna hitrost u na delu kanala [m s^{-1}]
u_i	časovno povprečne hitrosti v posameznih koordinatnih smereh i [m s^{-1}]
u_*	strižna hitrost [m s^{-1}]
v	horizontalna hitrost toka v smeri osi y [m s^{-1}]
v_f	horizontalna hitrost toka na poplavnem področju v smeri osi y [m s^{-1}]
v_m	horizontalna hitrost toka v glavni strugi v smeri osi y [m s^{-1}]
v_r	relativna hitrost toka v smeri osi y na poplavnem področju [-]
\bar{v}	globinsko povprečna hitrost v [m s^{-1}]
V	velikost vektorja hitrosti [m s^{-1}]
V_p	volumen vode v prekatu ribje steze [m^3]
W	širina kanala ribje steze [m]
x, y, z	posamezne koordinatne smeri [m]
z_b	kota dna [m]
Γ_ϕ	koeficient laminarne difuzije skalarja Φ [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
Γ_{ϕ_t}	koeficient turbulentne difuzije skalarja Φ [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
δ_{ij}	Kronecker-jev delta (znaša 1 za $i = j$, sicer znaša 0) [-]
Δ	velikost filtra [m]
Δh	višinska razlika [m]
Δt	časovni korak [s]
$\Delta x, \Delta y$	korak numerične mreže [m]
ε	disipacija turbulentne kinetične energije na enoto mase [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$]
λ	modelno merilo [-]
λ_L	modelno merilo za dolžine [-]
λ_V	modelno merilo za višine [-]
ν	kinematični koeficient laminarne viskoznosti [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
ν_{num}	numerična difuzija [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
ν_t	kinematični koeficient turbulentne viskoznosti [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
$\bar{\nu}_t$	povprečna vrednost kinematičnega koeficienta turbulentne viskoznosti [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
ρ	gostota vode [kg m^{-3}]
ρ_0	referenčna gostota vode [kg m^{-3}]
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	empirični konstanti v $k - \varepsilon$ modelu turbulence [-]
σ_t	Schmidtovo število [-]
τ_b	strižna napetost ob dnu [Nm^{-2}]
τ_w	strižna napetost ob steni [Nm^{-2}]
τ_{ij}	tenzor turbulentnih (Reynoldsovih) napetosti [Nm^{-2}]
Φ	trenutna vrednost skalarja (npr. koncentracija snovi, temperatura, slanost, ipd.)
ϕ	časovno povprečna vrednost skalarja Φ

min, max	minimalna in maksimalna vrednost
------------	----------------------------------

1 UVOD

Območja ob rekah so že od nekdaj privlačila civilizacije, saj ponujajo vrsto dejavnikov, ki prispevajo k boljši kakovosti bivanja: voda za namakanje in potrebe gospodinjstev, za potrebe industrije, predstavlja praktično neusahljiv vir trajnostne energije, omogoča enostavne prometne povezave in predstavlja dragocen habitat prostoživečim organizmom. Na račun porasta prebivalstva in pozitivnih dejavnikov, ki jih nudi življenje v bližini rek, so dandanes območja ob rekah, vključno s tradicionalno poplavnimi območji, gosto poseljena. Vendar pa lahko poplave tudi danes, kljub izvedenim ukrepom za zaščito pred njimi, prizadenejo gosto naseljena območja. Zato se je treba nanje pravočasno pripraviti. Obvladovanje nevarnosti poplav obsega različne ukrepe za preprečitev nastanka poplav, kot tudi ukrepe za zmanjšanje njihovih posledic, med katerimi sta najpomembnejša spremljanje in proučevanje poplavne nevarnosti (Žmauc, 2005). Za poznavanje dinamike in omejitev obsega poplav je potrebno poznavanje preteklih poplav, saj lahko na podlagi tega znanja izvedemo potrebne omilitvene ukrepe v prihodnje. Tako pridemo do modeliranja poplav in s pomočjo raznih ukrepov omejevanja njihovega vpliva.



Slika 1.1: Umetnost in znanost hidravličnega modeliranja rek (povzeto po Knight, 2013, str. 5).

Figure 1.1: The art and science of river engineering (adapted from Knight, 2013, p. 5).

Med poplavo voda prestopi bregove in se razlije po poplavnih površinah (slika 1.2). Modeliranje takšnega toka vode, ki pri visokih pretokih teče deloma po strugi in deloma po poplavnih površinah, je zaradi kompleksnosti interakcij med njima izredno zahtevna naloga. Tok vode s prosto gladino se največkrat modelira na dva načina: s fizičnimi ali matematičnimi modeli. Dandanes se noben večji hidravlični projekt, za katerega obstaja vsaj najmanjši dvom o njegovem optimalnem delovanju, ne gradi brez predhodnega hidravličnega modeliranja, bodisi na fizičnem bodisi matematičnem modelu. Prednost prvih je v tem, da je z njimi možno obravnavati splošne tridimenzionalne tokove z vsemi geometrijskimi detajli. Matematični modeli pa so po drugi strani lahko bistveno cenejši, z njimi pa lahko modeliramo precej večja območja (Četina, 1998). Za reševanje številnih hidravličnih problemov, posebno tistih, pri katerih so dovoljene določene poenostavitve, se vedno pogosteje uporablja matematične modele. Za boljše študije hidrodinamičnih problemov pa se še vedno uporablja fizične modele, matematični modeli pa v teh primerih lahko služijo za določanje robnih pogojev (Webber, 2003).



Slika 1.2: Poplavljanje reke Save pred Hrvaško mejo 19. 9. 2010 (foto: N. Pogačnik).

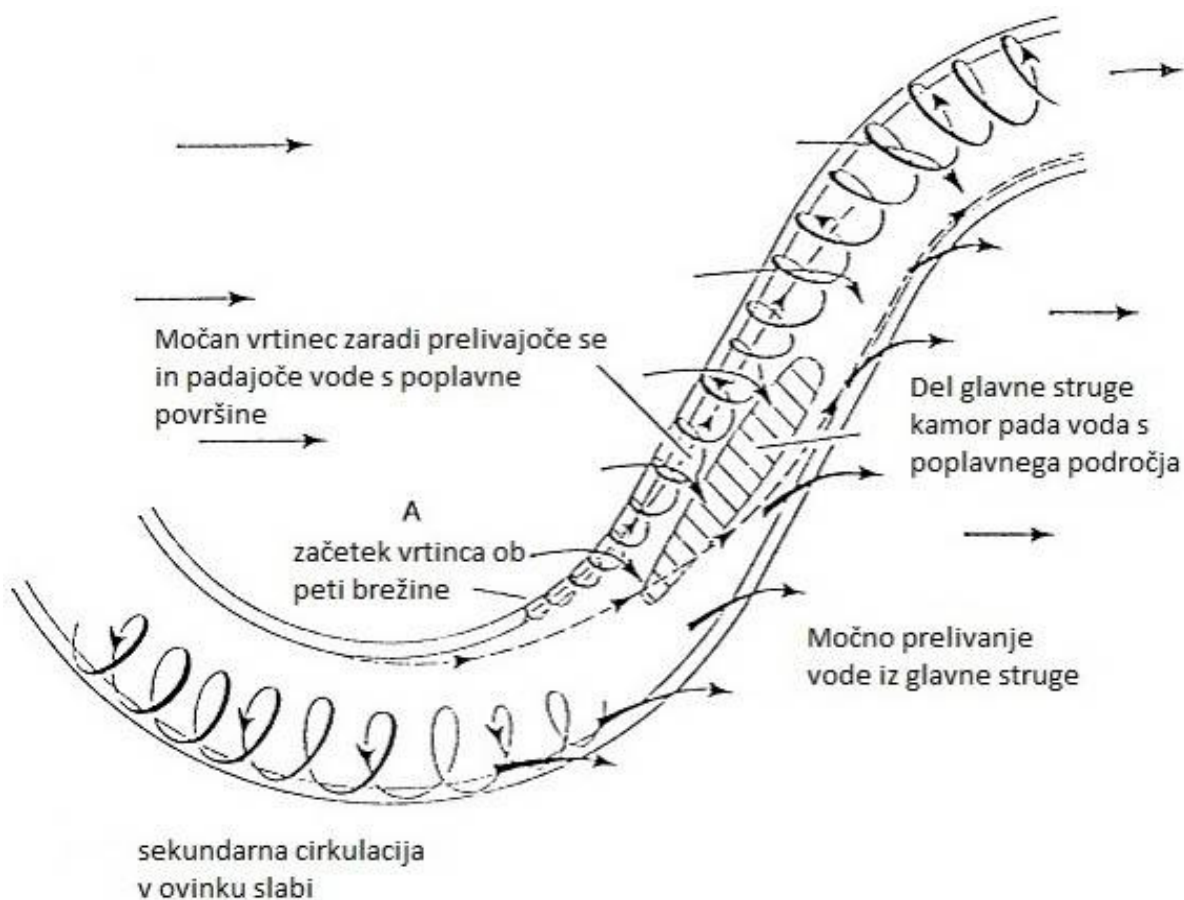
Figure 1.2: Flooding of the Sava River before the Croatian border 19. 9. 2010 (Photo: N. Pogačnik).

Tako v hidravliki kot tudi na ostalih področjih mehanike tekočin so tokovi, ki se pojavljajo v praksi, skoraj vedno turbulentni. Tudi na prehodu iz struge na poplavna področja in obratno je tok vode izrazito turbulenten. Turbulenca je nestabilno tridimenzionalno gibanje, v katerem prevladujejo močno nelinearne interakcije med vrtinci različnih meril. Glavne lastnosti turbulence so nered, mešanje in prisotnost tridimenzionalne vrtinčnosti. Zaradi naštetih lastnosti je turbulentno gibanje in z njim povezan transport toplotne energije in mase snovi izredno težko teoretično izračunati oziroma napovedati (Rodi, 1993). Pred časom so probleme, kjer je bila turbulenca izrazita, reševali v glavnem s pomočjo fizičnega modeliranja. V zadnjih letih pa razvoj računalnikov omogoča precej hitrejšo reševanje enačb, ki opisujejo take tokove, s pomočjo matematičnih modelov. Z večanjem zahtev po

čim večji natančnosti in verodostojnosti rezultatov se uveljavlja hibridno hidravlično modeliranje, ki ga sestavlja povezano fizično in matematično modeliranje nekega pojava.

1.1 Opis problematike

Tok v kanalih s prečnim prerezom, sestavljenim iz glavne struge in poplavnih področij, predstavlja kompleksen tridimenzionalni problem. Že v primeru relativno ravnih rečnih odsekov se kompleksnost toka izjemno poveča, ko voda prestopi bregove in začne teči tudi po poplavnih področjih. V primeru meandrirajočega struge sta struktura in interakcija tokov po strugi in po poplavnem področju še veliko bolj zapleteni (Knight in sod., 2009) (slika 1.3). Poznavanje lastnosti toka v kanalih s sestavljenim prečnim prerezom je ključnega pomena za njegovo primerno matematično modeliranje. Pomemben del obravnave tega pojava je prečni prenos gibalne količine med hitro gibajočimi se delci v strugi in počasnejšimi delci na poplavnih področjih. Pojav prenosa gibalne količine v prečni smeri je še posebej očiten na stiku med strugo in poplavnimi področji in je posledica velikega gradienta vzdolžnih hitrosti v prečni smeri na tem delu kanala. Zaradi tega močnega gradienta se na meji med strugo in poplavnimi področji tvorijo vrtinci z vertikalno osjo, ki omogočajo interakcijo med počasi gibajočo vodo na poplavnih področjih in hitro gibajočo vodo v strugi (slika 2.1). Prenos gibalne količine je tako rezultat turbulentnih strižnih napetosti, preko katerih se prenese del energije s hitro plavajočih delcev v strugi na počasnejše delce na poplavnih področjih (Keller in Rodi, 1988).



Slika 1.3: Tok vode v meandrirajoči strugi s poplavnimi področji (povzeto po Bousmar, 2002, str. 4).

Figure 1.3: Flow structure in a meandering compound channel (adapted from Bousmar, 2002, p. 4).

Strokovnjaki na področju hidravlike že vrsto let raziskujejo dogajanje na interakciji med tokom vode v strugi in na poplavnih področjih. Če želimo natančno določiti pretočno sposobnost sestavljenega prereza in razporeditev hitrosti po prečnem prerezu, moramo dobro poznati dogajanje na stiku. S tem namenom so bile v preteklosti opravljene številne raziskave na fizičnih modelih rečnih odsekov s sestavljenim prečnim prerezom pravilnih oblik. Podrobnejši pregled opravljenih raziskav na to temo (tako na fizičnih kot tudi matematičnih modelih) sta v knjigi "Flow and sediment transport in compound channels: the experience of Japanese and UK Research" predstavila Ikeda in McEwan (2009). V nadaljevanju poglavja bodo opisane zgolj bistvene ugotovitve za nas zanimivejših raziskav.

Sellin je kot prvi leta 1964 opisal pojav vertikalnih vrtincev na meji med strugo in poplavnimi površinami. Nadaljnje raziskave (Zheleznyakov, 1971; Rajaratnam in Ahmadi, 1979 in 1981; Knight in Demetriou, 1983; Knight in sod., 1983 in 1984, Shiono in Knight, 1991; Tominaga in Nezu, 1991; Nezu in sod., 1999; Ikeda in sod., 1994 in 2000) so potrdile prisotnost teh vrtincev ter pomemben prenos gibalne količine v prečni smeri iz glavne struge na poplavna področja. Omenjene raziskave so bile opravljene na prostorsko omejenih fizičnih modelih ravnih rečnih odsekov s pravilnimi (pravokotnimi) oblikami struge in poplavnih področij. V praksi pa vodotoki seveda nikoli niso ravni, kaj šele, da bi bil njihov prečni prerez pravilnih geometrijskih oblik. Zato so bile izvedene hidravlične modelne raziskave na meandrirajočih rečnih odsekih (Toebe in Sooky, 1967; Ervine in sod., 1993; Shiono in Muto, 1998; Sellin in sod., 1993; Lambert in Sellin, 1996; Patra in Kar, 2000; Khatua in Patra, 2008 in 2009; Sanjou in Nezu, 2010). Ugotovljeno je bilo, da so procesi v primeru meandrirajočih strug veliko kompleksnejši kot v primeru ravnih rečnih odsekov. Ko voda prestopi bregove, so tokovi, ki se pojavijo, še bistveno kompleksnejši. Tok vode v strugi sledi meandrirajoči geometriji struge, medtem ko tok vode po retenziji teče v smeri padca poplavnih področij. Tako prihaja na stiku med poplavnim področjem in strugo do kompleksnega mešanja obeh tokov in še bolj izrazite interakcije med njima, kot v primeru ravnih rečnih odsekov. Dogajanje je zelo pogojeno z obliko poplavnih področij, ki so lahko konstantne širine in tečejo vzporedno s strugo, lahko pa struga meandrira po območju fiksne širine. Pomembna je tudi stopnja meandriranja struge, razmerje med višino vode na poplavnih področjih in višino vode v strugi, oblike brežine struge, itd. Različni avtorji so razvili empirične enačbe, s katerimi lahko izračunamo pretočno sposobnost kanala s sestavljenim prečnim prerezom. Vendar pa so te enačbe navadno prilagojene meritvam na eni ali več podobnih oblikah sestavljenega kanala, v primeru drugačne geometrije pa dajejo napačne rezultate. Še vedno pa govorimo o geometrijsko pravilnih oblikah rečnih odsekov, ki so v naravi prej redkost kot pravilo. Iz vsega naštetega lahko vidimo, da je analitična obravnava hkratnega toka po strugi in po poplavnih področjih za konkretne primere, ki nastopijo v naravi, praktično nemogoča.

Primere, ki nastopajo v naravi, tako navadno rešujemo s fizičnimi ali numeričnimi modeli. Čeprav je tok v rekah s poplavnimi področji tridimenzionalen, še posebno na meji med glavno strugo in poplavnimi področji, ni nujno, da uporabimo 3D matematične modele (Keller in Rodi, 1988). Navadno nas namreč ne zanima detajlno dogajanje na mikro merilu, temveč bolj praktični parametri toka kot na primer razporeditev strižnih napetosti ob dnu, kote gladine ter hitrosti vode. Takšne rezultate pa lahko dobimo z uporabo dvodimenzijskega (2D) matematičnega modela, čigar najvažnejši problem je modeliranje interakcije med hitrejšim tokom v strugi in izrazito počasnejšim tokom na

poplavnih področjih. Na tej meji se pojavi izrazita turbulenca, katere modeliranje je pomembno za dobro simulacijo pojava v naravi. Opis turbulence ter različnih konceptov njenega modeliranja je podrobneje opisan v poglavju 2.3. Prav primerjava in natančna analiza parametrov različnih modelov turbulence pa predstavlja jedro doktorske naloge.

1.2 Zasnova naloge in pregled poglavij

Za tokove v rekah s poplavnimi področji je značilno, da zanje manjka zanesljivih meritev v naravi. Čeprav je moč meriti gladino v različnih profilih, pa je precej malo verjetno, da bi kakšen poplavni tok ostal dovolj časa stalen, tako da bi lahko izvedli natančne meritve hitrosti. Še posebej težko je na terenu izmeriti mejne strižne napetosti. Zaradi teh težav se strokovnjaki večinoma zatekajo k podatkom, pridobljenim na fizičnih hidravličnih modelih. Večina sistematičnih eksperimentalnih raziskav je bila izvedena v pravokotnih kanalih s simetričnimi ali nesimetričnimi poplavnimi področji, z enakomerno hrapavostjo tako na poplavnih področjih kot tudi v strugi. Predvsem za praktične primere nepravilnih oblik, ki so navadno tudi geometrijsko veliko obsežnejši, manjka merjenih podatkov iz narave ali fizičnih modelov (Werner in Lambert, 2007).

V sklopu doktorskega dela smo najprej na geometrijsko enostavnem primeru pravokotnega kanala s sestavljenim prečnim prerezom analizirali vgrajene modele turbulence v matematični model PCFLOW2D, ki ga že več kot dve desetletji stalno razvijajo in dopolnjujejo na Katedri za mehaniko tekočin Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Na tem primeru smo opravili tudi izračune s komercialnim programskim paketom MIKE (DHI, 2012), ki med drugim omogoča drugačen pristop modeliranja toka v rekah s poplavnimi področji, saj se lahko tok vode v strugi modelira z 1D modelom, tok na poplavnih površinah pa z 2D modelom.

Praktičen primer toka v rekah s poplavnimi področji je predstavljalo območje bodoče HE Brežice z obsežnimi poplavnimi področji, ki je bilo v okviru študije hibridnih hidravličnih modelov (HHM) natančno modelirano na fizičnem modelu in so bili zanj na voljo podatki o meritvah (Rodič in sod., 2010).

V prvi fazi je bila na podlagi serije numeričnih simulacij ob različnih predpostavkah (upoštevanje različne hrapavosti in koeficientov turbulentne viskoznosti) izvedena analiza vpliva teh parametrov na tokovne razmere ter izmenjave vode med glavno strugo in poplavnimi področji. Laboratorijski poizkusi so na zelo enostavnih primerih pokazali vpliv hrapavosti na izmenjavo energije med strugo in poplavnimi področji, ki se povečuje z večanjem hrapavosti (Knight in sod., 1983).

V drugi fazi je bila opravljena analiza vpliva uporabljenega modela turbulence na rezultate. V matematičnem modelu PCFLOW2D so trenutno vgrajeni trije različni modeli turbulence: model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti, model Smagorinsky in $k-\varepsilon$ model. Najenostavnejši je model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti, ki upošteva vnaprej predpisano vrednost turbulentne viskoznosti, ki pa je pogosto vnaprej ne poznamo. Tudi model turbulence, ki ga

je predlagal Smagorinsky (1963), je razmeroma enostaven. Vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti se enostavno izračunajo iz gradientov časovno povprečnih hitrosti. Za razliko od drugih dveh modelov turbulence pa je $k - \varepsilon$ model zahtevnejši, saj v vsakem časovnem koraku preko dveh transportnih enačb v vsaki računski celici obravnavanega območja izračuna stopnjo turbulentne kinetične energije na enoto mase k ter njene disipacije ε . Z uporabo vsakega od treh modelov turbulence smo izvedli simulacije nekaj praktičnih primerov toka visokih voda, kjer se voda razliva tudi preko poplavnih področij, rezultate primerjali z meritvami na fizičnem modelu in na tej osnovi ocenili njihovo uporabnost, natančnost in ekonomičnost.

Ker se je tekom raziskav izkazalo, da pri izračunu hidrodinamike toka na obravnavanem poplavnem območju nad predvideno HE Brežice turbulentna ter njeno modeliranje zaradi razmeroma velikega obsega poplavljenih površin ne igrata bistvene vloge, smo izvedli dodatne raziskave. Opravili smo analizo vpliva posameznega člena v dinamični enačbi, ki opisuje gibanje tekočine.

Nadalje smo obravnavali primer toka, kjer je turbulentna zelo izrazita in ima uporabljen model turbulence velik vpliv. Takšen primer predstavlja tok vode v ribji stezi, za katero smo izdelali tako fizični kot tudi matematični model. Na podlagi rezultatov uporabljenega modela turbulence z dvema transportnima enačbama $k - \varepsilon$ smo umerili in analizirali druga dva uporabljena modela; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti in model turbulence Smagorinsky. Model Smagorinsky predstavlja dokaj enostaven model turbulence brez transportnih enačb, ki določa kinematični koeficient turbulentne viskoznosti v času in prostoru. Model Smagorinsky je bil pred kratkim vgrajen v matematični model PCFLOW2D (Hamzić, 2012) in tako še ni bil ustrezno testiran. S tem namenom smo na podlagi serije simulacij opravili občutljivostno analizo empiričnega koeficienta C_s , ki je vgrajen v model. Rezultate matematičnega modela, ob uporabi različnih modelov turbulence, smo primerjali z meritvami na fizičnem modelu.

Glavne prispevke k razvoju matematičnega modela PCFLOW2D lahko strnemo v naslednje točke:

- detajlna občutljivostna analiza vpliva posameznega parametra (koeficient hrapavosti in koeficient turbulentne viskoznosti) modela na potek gladin in razpored globinsko povprečnih hitrosti v toku,
- ocena ustreznosti uporabljenega modela turbulence v matematičnem programu PCFLOW2D na podlagi meritev na fizičnem modelu,
- testiranje vgrajenega modela turbulence Smagorinsky ter občutljivostna analiza koeficienta C_s .

Dolgoročno bodo tako dopolnjen matematični model PCFLOW2D in sorodni dvodimenzijski globinsko povprečni modeli lahko hitra in učinkovita orodja za simulacijo različnih poplavnih pojavov. Podrobna občutljivostna analiza posameznih parametrov modela in detajlna primerjava z rezultati, izmerjenimi na fizičnem modelu, nam omogočata lažje umerjanje matematičnih modelov ter zagotavljata večje zaupanje v tako dobljene rezultate.

V prvem poglavju je opisana problematika toka v rekah s poplavnimi področji. Podan je pregled opravljenih raziskav drugih avtorjev na tem področju. Sledi opis naloge doktorske disertacije ter pregled posameznih poglavij. V drugem poglavju so opisane teoretične osnove matematičnega modeliranja. Prikazane so splošne enačbe, ki opisujejo gibanje tekočin. Opisan je pojav turbulence ter različni koncepti in modeli za njen izračun. Na podlagi predpostavk in poenostavitev so prikazane enačbe, uporabljene v 2D matematičnem modelu PCFLOW2D. Opisan je programski paket MIKE (DHI, 2012), ki smo ga prav tako uporabili pri izračunih v nalogi. V tretjem poglavju so na idealiziranem primeru prikazani različni pristopi k numeričnemu modeliranju toka v rekah s poplavnimi področji. Obravnavan je primer toka v pravokotnem kanalu enostavne oblike, v katerem je prečni prerez sestavljen iz struge na eni ter poplavne površine na drugi strani. Za opisan primer so bili namreč v literaturi na voljo podatki o meritvah na fizičnem modelu, ki so potrebni za oceno pravilnosti matematičnih izračunov. Med seboj smo primerjali rezultate izračunov z različnimi modeli turbulence, ki so vgrajeni v program PCFLOW2D. Na tem primeru smo uporabili in ovrednotili tudi komercialni programski paket MIKE (DHI, 2012), ki med drugim omogoča drugačen pristop k modeliranju toka v rekah s poplavnimi področji, saj se lahko tok vode v strugi modelira z 1D modelom, tok na poplavnih površinah pa z 2D modelom. V četrtem poglavju je opisan fizični hidravlični model območja HE Brežice. Opisane so opravljene raziskave in meritve na modelu. Sledi prikaz rezultatov modela. V petem poglavju je opisan matematični model območja HE Brežice. Opisu splošnih karakteristik modela, kot so velikost numerične mreže, število računskih celic, časovni korak, itd., sledi opis postopka umerjanja modela. Predstavljena je občutljivostna analiza modela na koeficient hrapavosti ter koeficient turbulentne viskoznosti. Rezultate različnih modelov turbulence smo primerjali z meritvami na fizičnem modelu. Na konkretnem primeru toka v reki s poplavnimi področji je prikazana natančna analiza vpliva posameznega člena v dinamični enačbi. S prikazom vodnih poti po retenzijskih površinah, globlin in hitrosti vode ter razdelitvijo pretoka na strugo in poplavne površine smo detajlno analizirali tok vode na obravnavanem področju. V šestem poglavju je opisan fizični model ribje steze. V ribji stezi je tok vode izrazito turbulenten, zato je vpliv uporabljenega modela turbulence večji. Opisane so opravljene raziskave in meritve na modelu. V sedmem poglavju je opisan matematični model ribje steze. Zopet je analiziran vpliv koeficienta hrapavosti na rezultate. Sledi opis problema numerične difuzije, ki se ga lahko odpravi z ustrezno gosto numerično mrežo. Rezultate uporabljenih treh modelov turbulence smo primerjali z meritvami na fizičnem modelu. Detajlneje so predstavljeni rezultati $k - \varepsilon$ modela turbulence, ki za izračun turbulentnih količin uporablja dodatni transportni enačbi. S tem modelom turbulence je, ob analizi različnih geometrij, prikazana možnost optimizacije ribje steze. Prikazana je občutljivostna analiza empiričnega koeficienta C_s , ki je vgrajen v model Smagorinsky. Čeprav se v navodilih številnih komercialnih matematičnih modelov za koeficient C_s pojavlja standardna priporočena vrednost znotraj ozkega intervala, so lahko tako izračunani rezultati precej netočni, kar je prikazano na konkretnem primeru toka v ribji stezi. Ključne ugotovitve so povzete v osmem poglavju z zaključki. V devetem poglavju so prikazane možnosti nadaljnega raziskovalnega dela. V zadnjem poglavju je naštet uporabljena literatura.

2 OSNOVNE ENAČBE, KI OPISUJEJO GIBANJE VODE

Enačbe, ki opisujejo gibanje tekočin, so izpeljane iz zakona o ohranitvi mase, zakona o ohranitvi gibalne količine in zakona o ohranitvi toplotne energije ali mase tuje snovi. Pri izpeljavi enačb za gibanje vode, ki jih obravnavamo v nalogi, upoštevamo dve predpostavki:

- Stisljivost je majhna in jo zato lahko zanemarimo, saj so hitrosti toka majhne v primerjavi s hitrostjo širjenja zvoka v vodi.
- Gostota vode je konstantna, zato lahko v enačbah v vseh ustreznih členih namesto dejanske gostote ρ upoštevamo neko konstantno referenčno gostoto ρ_0 , razen v vzgonskem členu v dinamični enačbi, ki zajema vpliv spremenljive gostote. Predpostavka je znana pod imenom Boussinesquova aproksimacija in jo je upošteval tudi Četina (1992), po katerem povzemamo izpeljavo enačb za globinsko povprečni tok, uporabljenih v modelu PCFLOW2D.

2.1 Sistem osnovnih diferencialnih enačb za tok realne tekočine

Ob upoštevanju predpostavk, navedenih v uvodu poglavja, lahko osnovne enačbe v tenzorskem načinu in v konservativni obliki zapišemo:

- ohranitev mase (kontinuitetna enačba):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

- ohranitev gibalne količine (dinamična Navier-Stokesova enačba):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2.2)$$

- ohranitev toplotne energije ali mase tuje snovi (konveksijsko-difuzijska transportna enačba za skalar Φ):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial U_i \Phi}{\partial x_i} = \Gamma_\Phi \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i \partial x_i} + S_\Phi \quad (2.3)$$

kjer je:

U_i	.....	trenutne hitrosti v posameznih koordinatnih smereh
P	.....	trenutni tlak
x_i	.....	posamezne koordinatne smeri
t	.....	čas
ν	.....	kinematični koeficient laminarne viskoznosti
ρ	.....	gostota
f_i	.....	volumska sila na enoto mase v koordinatni smeri i

Φ trenutna vrednost skalarja (koncentracija snovi c , temperatura T , slanost s , ipd.)

S_Φ izvorni člen skalarja Φ

Γ_Φ laminarna difuzija skalarja Φ

Splošna analitična rešitev zgornjih enačb ne obstaja, razvite pa so uspešne numerične metode za njihovo reševanje. Za najenostavnejše primere se dandanes že lahko uporablja direktna numerična simulacija, ki pa je časovno in računalniško zelo potratna. Turbulentna struktura toka je namreč tipično tisočkrat manjša od karakteristične dolžine obravnavanega področja, tako da bi morala biti numerična mreža še veliko gostejša (število diskretiziranih točk reda velikosti 10^9), kar je, v primeru turbulentnih tokov praktičnega pomena, preveč tudi za najzmogljivejše računalnike. So pa rezultati simulacij enostavnih primerov, pridobljeni s takim računom, tako rekoč enako dobri kot rezultati, dobljeni z eksperimentalnimi metodami. Zato lahko take rezultate uporabljamo celo kot kontrolo pri vrednotenju drugih matematičnih modelov.

Danes se večinoma uporablja statistični pristop povprečenja Navier-Stokesovih enačb po času ali po prostoru. Pristop povprečenja po času, ki ga je med prvimi predlagal Osborne Reynolds, je danes pogostejši. Vedno bolj pa se uveljavlja tudi povprečenje po prostoru, ki vodi do neposredne simulacije velikih vrtincev (Large Eddy Simulation – LES), polempirično pa se modelira samo turbulentna struktura, ki je drobnejša od numerične mreže.

2.2 Enačbe za srednji tok

Reynoldsovo povprečenje Navier-Stokesovih enačb po času pravi, da so trenutne vrednosti hitrosti U_i , pritiska P in vrednost skalarja Φ sestavljene iz srednje in pulzirajoče vrednosti:

$$U_i = u_i + u_i' \quad (2.4)$$

$$P = p + p' \quad (2.5)$$

$$\Phi = \varphi + \varphi' \quad (2.6)$$

Kjer so u_i' , p' , φ' fluktuacije, u_i , p in φ pa srednje vrednosti, definirane kot:

$$u_i = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} U_i dt \quad (2.7)$$

$$p = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad (2.8)$$

$$\varphi = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Phi dt \quad (2.9)$$

Razlika časov $t_2 - t_1$ je lahko velika v primerjavi s časovnim merilom turbulentnega toka. Če relacije (2.7) - (2.9) vstavimo v enačbe (2.1), (2.2) in (2.3) in člene povprečimo, dobimo enačbe za časovno povprečne vrednosti:

- kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.10)$$

- dinamična Navier-Stokesova enačba:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + f_i \quad (2.11)$$

- konvekcijsko-difuzijska transportna enačba za skalar Φ :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial u_i \Phi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} - \overline{u_i \Phi} \right) + S_\Phi \quad (2.12)$$

S procesom povprečenja smo v enačbah (2.10) - (2.12) pridelali novi neznanki $\overline{u_i u_j}$ in $\overline{u_i \Phi}$. Fizično ta dva člena, pomnožena z gostoto ρ , predstavljata transport gibalne količine in toplotne energije oziroma mase tuje snovi zaradi pulzirajočega turbulentnega gibanja. V veliki večini primerov (turbulentnih tokov) sta ta dva člena precej večja od laminarnih členov $\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ in $\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}$, ki sta zato v teh primerih večkrat zanemarljena.

Enačbe za srednje vrednosti hitrosti, tlaka in temperature (2.10) - (2.12) je mogoče rešiti le, če znamo na nek način določiti korelacije med $\overline{u_i u_j}$ in $\overline{u_i \Phi}$. Glavni problem pri modeliranju turbulence je ravno določitev teh korelacij. Za njihovo določitev je potrebno vpeljati **model turbulence**, ki aproksimira povezave z manjšim številom novih neznank, kot je število korelacijskih enačb.

2.3 Modeli turbulence

2.3.1 Opis turbulence

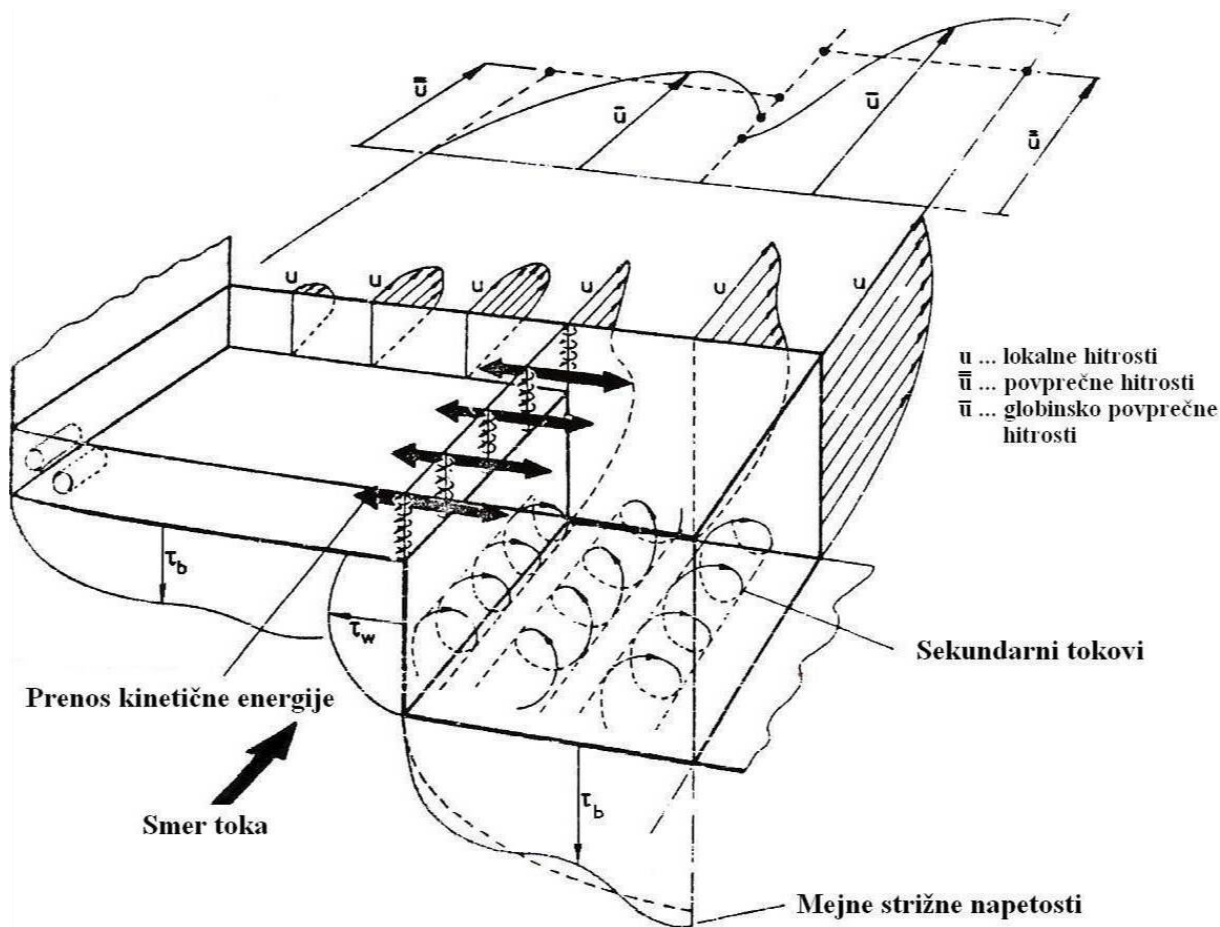
Turbulenco lahko opišemo kot vrtnično gibanje tekočine, ki pri velikih Reynoldsovih številih po navadi prevladuje. Velikost vrtincev je zelo različna, fluktuacije toka so razmeroma velike. Gibanje delcev je vedno vrtnično in je videti kot nekakšno neurejeno gibanje vrtničnih elementov v vseh smereh. Turbulenca je tudi zelo nestabilna. Velikost največjih vrtincev določajo robni pogoji in je

enakega velikostnega razreda kot osnovni tok (npr. širina kanala). Velikost najmanjših vrtincev, ki so povezani z visoko frekvenčnimi fluktuacijami, določajo viskozne sile v tekočini. Razlika med velikimi in najmanjšimi vrtinci je določena z Reynoldsovim številom. Večina transporta gibalne količine in mase je na račun "velikega turbulentnega gibanja (vrtincev) – *large scale turbulent motion*".

Veliki vrtinci medsebojno vplivajo na osnovni tok (velikostni red obeh je enak) in na ta način odvzemajo kinetično energijo osnovnemu toku ter jo pretvorijo v turbulentno gibanje velikih vrtincev. Ta energija se preko energijskega razpada prenaša na vedno manjše in manjše vrtince, dokler se preko viskoznih sil ne pretvori v notranjo energijo tekočine. Čeprav se energijska pretvorba zgodi na ravni najmanjših vrtincev, pa je količina pretvorjene energije odvisna od velikih vrtincev, saj oni odvzamejo energijo osnovnemu toku. Na količino pretvorjene energije viskoznost nima vpliva, odloča le o merilu, pri katerem se zgodi pretvorba. Pri velikih Reynoldsovih številih (razmerje med velikostjo velikih in malih vrtincev je veliko) lahko rečemo, da je gibanje malih vrtincev izotropično, medtem ko gibanje velikih vrtincev ni. To imenujemo lokalna izotropija in predstavlja pomemben koncept pri modeliranju turbulence.

Turbulenca je v praktičnih primerih toka v rekah s poplavnimi površinami najintenzivnejša na območju interakcije med strugo in poplavnimi področji. Na teh mestih prihaja do izmenjave gibalne količine med vodo v strugi in na poplavnih področjih. Ključnega pomena je prečna izmenjava ter disipacija energije oz. energijske izgube na tem delu. Pri interakciji gre v bistvu za turbulentno gibanje tekočine, ki je izrazito tridimenzionalno, kar je detajlno prikazano na sliki 2.1.

Na razporeditev lokalnih strižnih napetosti ob dnu (τ_b) in lokalnih strižnih napetosti ob steni (τ_w) kanala vplivajo sekundarni tokovi v glavni strugi kanala, kot je prikazano na sliki 2.1. Pri primeru na sliki 2.1, kjer je razmerje širine polovice glavne struge proti višini struge približno 2, sekundarni tokovi povzročijo odstopanje τ_b okrog srednje vrednosti, ki je na skici prikazana s črtkasto črto. V tem primeru je v sredini kanala lokalna strižna napetost večja, kot bi bila v primeru odsotnosti sekundarnih tokov. Par celic sekundarnih tokov, ki se vrtita v nasprotno smer, namreč povzroči usmeritev glavnega (vzdolžnega) toka proti dnu kanala. Razporeditev teh strižnih napetosti je pomembna, saj z njihovo integracijo določimo strižne sile, ki delujejo na posamezne elemente na meji kanala. Šele ko so znane strižne sile ob dnu in robu kanala, lahko določimo prenos gibalne količine med strugo in poplavnimi področji.



Slika 2.1: Hidravlični prikaz interakcije na prehodu vode iz struge na poplavno področje (povzeto po Knight, Demetriou in Hamed, 1983, str. 141).

Figure 2.1: Hydraulic aspects of overbank flow (adapted from Knight, Demetriou and Hamed, 1983, p. 141).

Zaradi velikega bočnega gradienta vzdolžnih hitrosti na vertikali med osnovno strugo in poplavnim področjem se na tej interakciji formirajo pokončni vrtinci. Ta fenomen je podrobneje preučeval Sellin (1964). Opisani mehanizem omogoča počasneje gibajoči vodi na poplavnem področju, da pride v interakcijo s hitreje gibajočo vodo v strugi.

Vertikalni profili vzdolžnih lokalnih hitrosti (u) ponazarjajo kompleksno naravo hitrostnega polja. Z integracijo teh vertikalnih profilov dobimo globinsko povprečne hitrosti (\bar{u}), katerih razporeditev je prav tako prikazana na sliki 2.1. Te hitrosti lahko nato integriramo po širini poplavnega področja oz. glavne struge in na ta način določimo srednje hitrosti določenega dela kanala ($\bar{\bar{u}}$).

2.3.2 Koncepti modelov

V grobem obstajata dva različna pristopa k matematičnemu reševanju hidravličnih problemov, povezanih s turbulenco. Navier–Stokesove enačbe lahko rešujemo preko direktne numerične simulacije (potrebno je veliko časa in hiter računalnik), lahko pa Navier–Stokesove enačbe časovno

povprečimo (Reynoldsova predpostavka) in jih modeliramo z različnimi modeli turbulence. Spodaj je podana groba razdelitev modelov turbulence:

Modeli s povprečenimi Navier-Stokesovimi enačbami (RANS)

- **Koncept turbulentne viskoznosti in difuzije**

Po analogiji z viskozniimi napetostmi pri laminarnem toku tudi za turbulentne napetosti predpostavimo, da so proporcionalne gradientom hitrosti srednjega toka.

- **Neposredno določanje turbulentnih napetosti**

Neposredno iz transportnih enačb se izpeljejo točne enačbe za turbulentne napetosti. Problem pri tej izpeljavi je, da na ta način vpeljemo v sistem nove neznanke, za katere ne poznamo medsebojnih povezav.

Modeli, ki direktno izračunajo pulzirajoče vrednosti

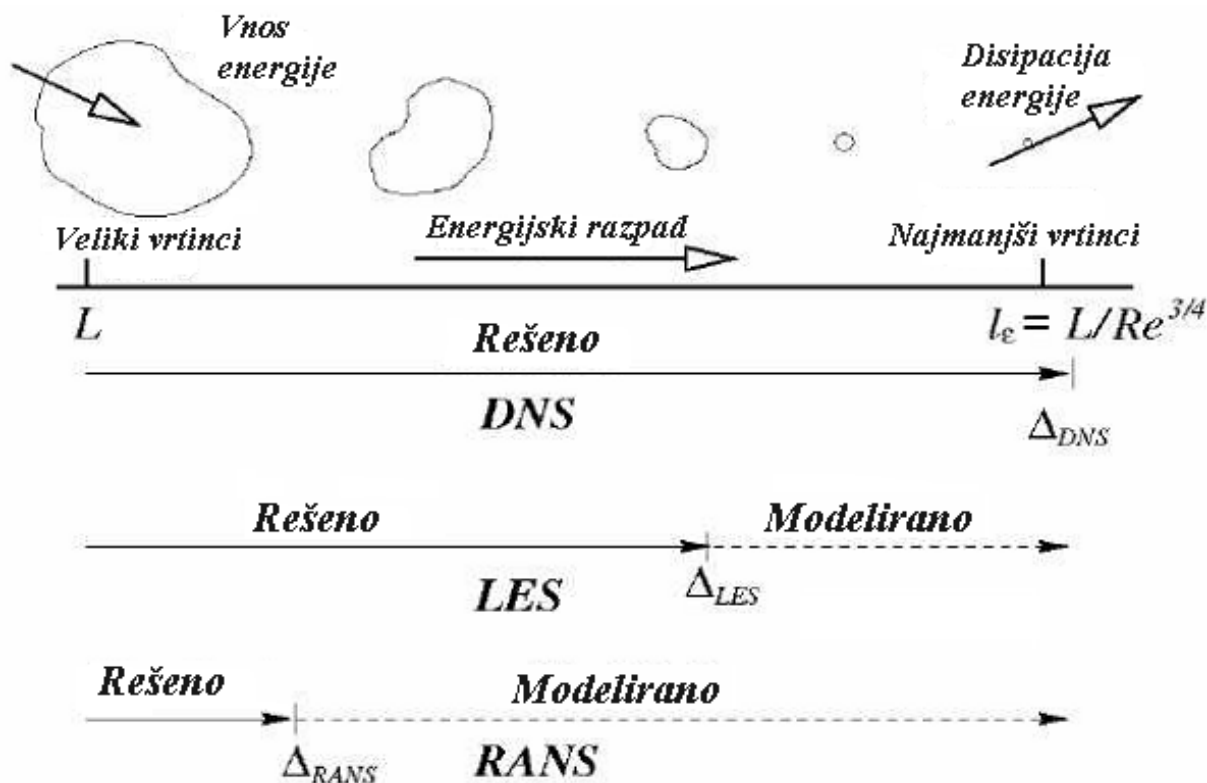
- **Neposredno reševanje velikih vrtincev (Large Eddy Simulation - LES)**

Pri tej metodi se gibanje velikih vrtincev izračuna direktno z rešitvijo Navier-Stokesovih enačb, gibanje vrtincev na manjšem merilu pa je modelirano.

- **Neposredno reševanje Navier-Stokesovih enačb (Direct Numerical Simulation - DNS)**

Direktno reševanje Navier-Stokesovih enačb. Zaenkrat se ta način modeliranja v praksi ne uporablja. Na akademski ravni se računajo tokovi z manjšimi Reynoldsovimi števili.

Stopnja modeliranja pri posameznem tipu je prikazana na sliki 2.2. Lepo je prikazana razlika med stopnjo računa (velikosti mreže), do katere se izvaja račun pri posameznem tipu modeliranja. Boljše rezultate seveda dobimo pri večji stopnji računa, vendar pa je za to potrebno več časa in zmogljivejši računalnik.



Slika 2.2: Stopnja modeliranja za različne tipe modelov turbulence (povzeto po Sodja, 2007, str. 6).

Figure 2.2: The level of modeling for different types of turbulence models (adapted from Sodja, 2007, p. 6).

Različne koncepte modelov turbulence nazorno podajajo številni avtorji, npr. Rodi (1993), Wilcox (1994), Četina (1988, 1992), Sodja (2007) itd., zato bomo na tem mestu podrobneje predstavili zgolj modele turbulence, ki smo jih uporabili v naši nalogi.

2.3.3 Koncept turbulentne viskoznosti in difuzije

Najstarejši predlog za model turbulentnih ali Reynoldsovih napetosti je koncept t.i. turbulentne viskoznosti. Ta koncept je 1877 postavil Boussinesq, še preden je Reynolds leta 1895 predstavil pristop s povprečenjem enačb. Koncept sam po sebi še ni model turbulence, predstavlja pa izhodišče za tak model. Temelji na predpostavki, da je turbulentno gibanje analogno gibanju molekul: turbulentne vrtince smatra za gmote tekočine, ki trkajo drug ob drugega kot molekule in si izmenjujejo gibalno količino. Molekularno gibanje vodi do Stokesovega zakona viskoznosti za laminarni tok, in po analogiji z viskoznostjo v laminarnem toku Boussinesqov koncept predpostavlja, da so turbulentne napetosti proporcionalne gradientom povprečne hitrosti. To lahko v splošnem izrazimo kot:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i u_j} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.13)$$

kjer je:

τ_{ij} tenzor turbulentnih napetosti

ν_t kinematični koeficient turbulentne viskoznosti
 k turbulentna kinetična energija na enoto mase
 δ_{ij} Kronecker-jev delta (znaša 1 za $i=j$, sicer znaša 0)

Analogno je turbulentni transport skalarja proporcionalen gradientu srednje vrednosti skalarja (Fickov zakon):

$$-\overline{\rho u_i \phi} = \Gamma_{\phi t} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (2.14)$$

kjer je $\Gamma_{\phi t}$ koeficient turbulentne difuzije skalarja ϕ .

Gre torej za to, da tekočini pripišemo še eno lastnost, namreč turbulentno viskoznost ν_t . Vendar pa za razliko od molekularne viskoznosti ν , turbulentna viskoznost ν_t ni lastnost tekočine, temveč toka, odvisna je od stanja turbulence. Vpeljava enačbe (2.13) zato še ne predstavlja pravega modela turbulence, saj je glavni problem s tem zgolj prestavljen na določitev porazdelitve ν_t .

Analogija med molekularnim in turbulentnim gibanjem v principu ne more biti pravilna. Kljub konceptualnim ugovorom pa se je ideja turbulentne viskoznosti v praksi pogosto dobro obnesla, enostavno zato, ker se ν_t za številne tokovne razmere lahko sorazmerno dobro aproksimira z značilnostmi turbulence (turbulentna kinetična energija na enoto mase k , dolžinsko merilo L , disipacija turbulentne kinetične energije na enoto mase ε).

2.3.3.1 Model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti

Model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti spada v skupino modelov turbulence, ki za določitev vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti ne vsebujejo dodatnih transportnih enačb za turbulentne količine (Rodi, 1993). Je najenostavnejši model turbulence, zanj velja:

$$\nu_t = konst. \quad (2.15)$$

In

$$\Gamma_{\phi t} = \frac{konst.}{\sigma_t} \quad (2.16)$$

kjer σ_t predstavlja Schmidtovo število.

Tak model lahko daje zadovoljive rezultate v primerih računov hidrodinamičnih veličin večjih vodnih mas ali pa pri nekaterih globinsko povprečnih modelih, kjer so turbulentni členi v dinamični enačbi manj pomembni (Rodi, 1993; Četina, 1988 in 1992). Potrebno je poudariti, da so v primeru računanja širjenja kontaminanta in posledično ob uporabi konvekcijsko difuzijske enačbe za skalar Φ , členi turbulentnega transporta skalarja vedno pomembni in bi bilo smiselno uporabiti točnejši model turbulence.

2.3.3.2 Model Smagorinsky

Tudi model turbulence Smagorinsky spada v skupino modelov turbulence, ki ne vsebujejo dodatnih transportnih enačb za izračun turbulentnih količin, saj se turbulentna viskoznost toka izračuna enostavno na osnovi gradientov časovno povprečnih hitrosti. Ta model je že leta 1963 predlagal Smagorinsky za izračun turbulentnih napetosti v pod mrežnem merilu (Sub Grid Scale – SGS). Model predpostavlja, da turbulentne napetosti v pod mrežnem merilu sledijo gradient-difuzijskemu procesu, podobno kot molekularno gibanje. Tako so turbulentne napetosti τ_{ij} definirane kot:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t S_{ij} \quad (2.17)$$

kjer je S_{ij} tenzor deformacijskih hitrosti, podan z enačbo:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.18)$$

Turbulentna viskoznost po Smagorinskem je definirana kot:

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.19)$$

kjer je Δ velikost filtra oz. velikost numerične celice:

$$\Delta = \sqrt{\Delta x_i \Delta x_j} \quad (2.20)$$

C_s predstavlja Smagorinsky-jev brezdimenzionalni empirični koeficient, ki se razlikuje od toka do toka. Smagorinsky-jev model turbulence se pogosto uporablja kot SGS model pri simulaciji velikih vrtincev (Large Eddy Simulation – LES). V takšnih primerih se vrednost koeficienta C_s navadno giblje v mejah od $0,10 < C_s < 0,24$ (Rogallo in Moin, 1984). Največja prednost modela je v njegovi preprostosti in računski stabilnosti, saj vsebuje le en spremenljiv parameter (Hamzić, 2012). Poleg tega je model Smagorinsky zelo uspešen, ker proizvaja ustrezno difuzijo in disipacijo, ki stabilizirata numerično reševanje (Wilcox, 1994).

Model Smagorinsky pa ni brez omejitev. Že leta 1966 je Lilly predlagal izboljšavo modela v smislu vključitve dinamike na manjših merilih, ki naj bi odpravila težavo modela pri prenosu energije nazaj iz manjših na večje vrtince. Pokazal je, da daje model Smagorinsky zadovoljive rezultate pri homogeni in izotropni turbulenci, vendar proizvaja prevelike izgube v sloju ob stenah. Zaradi omenjenih težav modela Smagorinsky so različni avtorji (Germano, 1992; Kim, 2001; Fang, 2011) vpeljali dinamični Smagorinsky-jev koeficient, ki je odvisen od prostora in časa. Takšni izboljšani modeli Smagorinsky razširijo možnost njegove uporabe in dajejo boljše rezultate, vendar se s tem izgubi na numerični stabilnosti ter hkrati bistveno poveča računske čase simulacij.

Čeprav je model turbulence Smagorinsky vgrajen v kar nekaj komercialnih programov (MIKE, CCHE2D, POM), je v vseh nam znanih delih vrednost koeficienta C_s obravnavana zgolj za primere pod mrežnega merila, za primere izračunov celotnega spektra turbulence, katerega se računa s takšnimi programi, pa ne. Podobno je v svojem doktorskem delu ugotavljal Kim (2001). Nekritična uporaba vrednosti koeficienta C_s lahko da zelo napačne rezultate, kot bo pokazano v nadaljevanju naloge, kjer bo predstavljena tudi podrobnejša analiza vpliva vrednosti koeficienta C_s na rezultate modela.

V programu PCFLOW2D je vgrajena osnovna oblika modela Smagorinsky, ki predstavlja dober kompromis med robustnostjo (in hitrostjo) ter natančnostjo modela. Pri pregledu literature smo ugotovili veliko nedoslednosti pri zapisu enačbe (2.19), saj nekateri avtorji navajajo drugačne enačbe. Ugotovili smo, da je tudi v PCFLOW2D vgrajena enačba (2.19) vsebovala to nedoslednost, ki pa smo jo odpravili med dopolnjevanjem modela tekom doktorskega dela.

Za primere izračunov, ko vnaprej ne poznamo detajlov toka oz. velikosti koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , je v programu na voljo kompleksnejši $k - \varepsilon$ model turbulence, ki vsebuje transportni enačbi za kinetično turbulentno energijo in njeno disipacijo.

2.3.3.3 Model $k - \varepsilon$ (model z dvema transportnima enačbama)

Tako imenovano standardno obliko $k - \varepsilon$ modela turbulence sta v svojem delu leta 1972 predstavila Jones in Launder. Model spada v skupino modelov turbulence, ki za izračun turbulentnega gibanja tekočine uporabljajo dve transportni enačbi: transportno enačbo za turbulentno kinetično energijo na enoto mase k in transportno enačbo za disipacijo turbulentne kinetične energije na enoto mase ε . Model je sorazmerno enostaven, njegova glavna prednost pa je v tem, da so konstante v modelu veljavne za širok spekter različnih vrst tokov. Zato ni čudno, da velja za najbolj razširjeni model turbulence danes. Na tem mestu bomo zgolj strnjeno podali veljavne enačbe modela, saj je njihova izpeljava podrobno opisana v literaturi (Jones in Launder, 1972; Pavlović, 1982; Rodi, 1993; Četina, 1988 in 1992). Turbulentna kinetična energija na enoto mase k je neposredno merilo za intenzivnost turbulence in je podana z naslednjim izrazom:

$$k = \frac{1}{2} \sum u_i'^2 \quad (2.21)$$

Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t lahko določimo preko Kolmogorov-Prandtllove relacije:

$$\nu_t = c_\mu \sqrt{k} L_m \quad (2.22)$$

kjer je c_μ empirična konstanta, L_m pa empirično določeno dolžinsko merilo. Preko enačbe 2.23 za ε pridemo do izraza za ν_t (enačba 2.24):

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{L_m} \quad (2.23)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.24)$$

Karakteristiki k in ε se spreminjata od točke do točke in vplivata tudi na vrednosti v sosednjih točkah. Zato potrebujemo transportne enačbe za k in ε .

V program PCFLOW2D je vgrajena osnovna verzija $k - \varepsilon$ modela turbulence za globinsko povprečni tok, ki sta jo razvila Rastogi in Rodi (1978), zato podajamo njune transportne enačbe za k in ε :

$$\frac{\partial(hk)}{\partial t} + \frac{\partial(huk)}{\partial x} + \frac{\partial(hvk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + hP_k - C_D h\varepsilon + hP_{kv} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial(h\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(hu\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(hv\varepsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + hC_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} h + hP_{\varepsilon v} \quad (2.26)$$

P_k predstavlja produkcijo turbulentne kinetične energije na enoto mase zaradi horizontalnih gradientov hitrosti osnovnega toka in je podana z enačbo:

$$P_k = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2.27)$$

P_{kv} in $P_{\varepsilon v}$ sta člena produkcije in disipacije turbulentne kinetične energije na enoto mase zaradi trenja ob dno in sta prek strižne hitrosti u_* definirana kot:

$$P_{kv} = C_k \frac{u_*^3}{h}; \quad C_k = \frac{1}{C_f^{1/2}}; \quad u_* = \sqrt{C_f (u^2 + v^2)} \quad (2.28)$$

$$P_{\varepsilon v} = C_\varepsilon \frac{u_*^4}{h^2}; \quad C_\varepsilon = \frac{C_{\varepsilon r} C_{2\varepsilon} C_\mu^{1/2}}{C_f^{3/4}}; \quad C_f = \frac{n_g^2 g}{h^{1/3}} \quad (2.29)$$

C_f predstavlja koeficient trenja ob dno, C_D , $C_{\varepsilon r}$, C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k in σ_ε pa so konstante v modelu turbulence. Njihove vrednosti so zbrane v preglednici 2 in so univerzalne za veliko različnih vrst tokov (Rodi, 1993). Seveda pa obstajajo primeri, ko je potrebno za boljšo simulacijo toka vrednosti posameznih koeficientov spremeniti ali jih nadomestiti s funkcijami (Rodi, 1993).

Preglednica 2.1: Empirične konstante pri globinsko povprečnem $k - \varepsilon$ modelu turbulence.

Table 2.1: Empirical constants for the depth-averaged $k - \varepsilon$ turbulence model for shallow water flows.

C_D	$C_{\varepsilon r}$	C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
1,0	3,6	0,09	1,44	1,92	1,0	1,3

Kot že omenjeno, je $k - \varepsilon$ model turbulence dandanes najbolj razširjen v svetu numeričnih simulacij turbulentnih tokov. Rezultati številnih izračunov različnih avtorjev so za več vrst tokov pokazali dobro ujemanje z meritvami, kar potrjuje uporabnost modela (Rodi, 1993). Z dvema transportnima enačbama, ki opisujeta turbulentno dogajanje v toku, je $k - \varepsilon$ model turbulence trenutno najkompleksnejši model turbulence, vgrajen v program PCFLOW2D. Čeprav so pri uporabi $k - \varepsilon$ modela turbulence potrebni daljši računski časi kot pri obeh prej opisanih modelih brez dodatnih transportnih enačb, ga je v primerih, ko je vpliv turbulence velik, vsekakor smiselno uporabiti.

2.4 Enačbe za globinsko povprečni nestalni tok s prosto gladino, uporabljene v programu PCFLOW2D

Pri računih, opisanih v tej nalogi, smo uporabljali enačbe za globinsko povprečni nestalni tok s prosto gladino (2D model). Predpostavke in detajle izpeljave enačb je podrobneje opisal Četina (1988), zato so na tem mestu predstavljeni le bistveni deli.

2.4.1 Predpostavke

Pri izpeljavi osnovnih enačb za globinsko povprečni model toka s prosto gladino izhajamo iz splošnih enačb (2.10) - (2.12). Upoštevali smo naslednje predpostavke:

- tok je približno dvodimenzionalen, tako da lahko vertikalno komponento hitrosti zanemarimo. Računamo z globinsko povprečnimi vrednostmi horizontalnih hitrosti, ki so definirane z izrazoma:

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u \, dz \quad (2.30)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{h} \int_0^h v \, dz \quad (2.31)$$

kjer pomeni h globino vode, \bar{u} in \bar{v} globinsko povprečni hitrosti v horizontalni smeri x in y , u in v pa dejanski hitrosti, odvisni od vertikalne koordinate z .

- iz zgornje predpostavke sledi, da se dinamična enačba za vertikalno smer poenostavi v preprosto enačbo za hidrostatično razdelitev tlakov, ki jo upoštevamo pri izpeljavi globinsko povprečnih enačb.

- energijske izgube zaradi trenja ob dno izrazimo z obliko Manningove empirične enačbe in privzamemo, da velja tudi za nestalni tok.

- omejili smo se na račun hidrodinamičnih lastnosti toka, širjenje kontaminanta nas ne zanima. Na ta način smo lahko izločili enačbo (2.12) in sta nam ostali le kontinuitetna enačba ter dinamična enačba v dveh horizontalnih smereh.

2.4.2 Osnovne enačbe za globinsko povprečni tok

Do globinsko povprečnih enačb za tok s prosto gladino pridemo z integracijo osnovnih tridimenzionalnih enačb (2.10) in (2.11) po globini. Ob upoštevanju privzetih predpostavk dobimo osnovne enačbe v obliki:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn_g^2 \frac{\bar{u}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right) \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial y} - gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_g^2 \frac{\bar{v}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}\right) \quad (2.34)$$

kjer je:

g gravitacijski pospešek
 z_b kota dna
 n_g koeficient hrapavosti po Manningu

Enačbe (2.32) - (2.34) so v konservativni obliki. Enačba (2.32) je kontinuitetna, enačbi (2.33) in (2.34) pa dinamični v x in y smeri.

2.5 Opis programskega paketa MIKE

Programski paket MIKE, ki ga že vrsto let razvijajo na danskem hidravličnem inštitutu DHI (Danish Hydraulic Institute), vsebuje celo paleto med seboj kompatibilnih hidravličnih modelov (enodimenzionalni (1D) model MIKE 11, dvodimenzionalni (2D) MIKE 21, tridimenzionalni MIKE 3, model za modeliranje kanalizacijskih in drenažnih sistemov MIKE URBAN, model MIKE FLOOD, ki povezuje oba enodimenzionalna in dvodimenzionalni model).

Hidravlični model MIKE 11 je namenjen modeliranju rečnih sistemov, kjer je tok vode izrazito enodimenzionalen (vzdolžna komponenta hitrosti vodnega toka je po prečnem prerezu enakomerna in ima smer osi vodotoka, prečno in vertikalno komponento je možno zanemariti). Uporablja se za modeliranje daljših in razvejanih rečnih sistemov, saj je potreben računski čas majhen. Model omogoča simulacijo različnih ovir v toku (npr. mostov) ter obratovanja hidrotehničnih objektov (npr. zapornic HE s predpisano pretočno krivuljo) (DHI, 2012a).

Kadar pa pride do izrazitega prelivanja vode na poplavna področja, je potrebno uporabiti globinsko povprečen dvodimenzionalni model MIKE 21. Z 1D modelom namreč ni mogoče z zadostno natančnostjo simulirati odtočnih razmer čez poplavne površine, saj se na njih pojavijo izrazitejšje komponente hitrosti pravokotno na smer glavnega toka vode (Rak, 2013). Princip računa z modelom MIKE 21 je zelo podoben kot pri modelu PCFLOW2D, zato ne bomo opisovali detajlov modela. Računsko območje se razdeli na računske celice, ki se jim pripiše nadmorsko višino, posameznim

območjem se predpiše ustrezno hrapavost, nazadnje se nastavi še začetne in robne pogoje. Problem 2D modelov je slabši opis geometrije struge vodotoka, saj so navadno računske celice relativno velike glede na dimenzije struge. Z zmanjševanjem računskih celic se njihovo število hitro močno poveča, kar ob hkratnem potrebnem manjšem časovnem koraku pomeni znatno daljše računske čase simulacij.

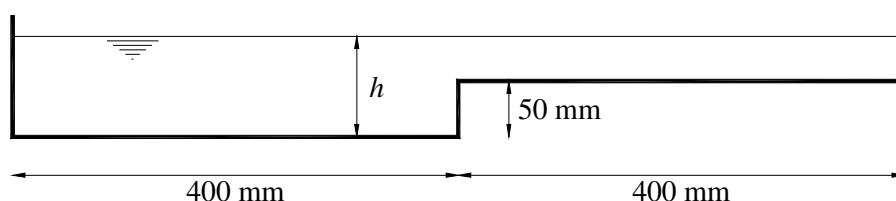
Prav s tem namenom so pri DHI razvili kombiniran model MIKE FLOOD, ki povezuje 1D in 2D model ter pri tem izkorišča prednosti posameznega hidravličnega orodja. Z modelom MIKE 11 se natančno modelira tok v strugi, z modelom MIKE 21 pa se na območjih, kjer prihaja do prelivanja vode iz struge, natančno modelira tok vode po poplavnih področjih. Za povezavo med obema modeloma se uporablja bočno povezavo (Lateral link), ki z različnimi možnimi enačbami prelivov izračuna prelivanje med točkami 1D in 2D modela (DHI, 2012c).

3 PRIMER TOKA V KANALU ENOSTAVNE OBLIKE

Za prvi testni primer računa toka v rekah s poplavnimi področji smo uporabili primer pravokotnega kanala z enakomernim vzdolžnim padcem, v katerem je prečni prerez sestavljen iz struge na eni ter poplavne površine na drugi strani. Za primerjavo in oceno ustreznosti izvedenih numeričnih simulacij so služile meritve na fizičnem modelu, ki jih je v svojem delu opisal Bousmar (2002). Na tem primeru je bila opravljena tudi primerjava med rezultati izračunov s polnim 2D matematičnim modelom PCFLOW2D, ki je bil kasneje uporabljen in detajlno analiziran na primerih, opisanih v poglavjih 5 in 7, ter komercialnim programskim paketom MIKE (DHI, 2012). Ta med drugim omogoča drugačen pristop k modeliranju toka v rekah s poplavnimi področji, saj se lahko tok vode v strugi modelira z 1D modelom, tok na poplavnih površinah pa z 2D modelom (model MIKE FLOOD).

3.1 Opis modela in izračunov

Pri izračunih z matematičnim modelom smo uporabili enako geometrijo prečnega prereza kanala kot Bousmar (2002) pri meritvah na fizičnem modelu (slika 3.1). Fizični model kanala je zaradi prostorskih omejitev laboratorija v dolžino meril le 10 m, medtem ko matematični model teh omejitev nima in je bil še enkrat daljši, in sicer 20 m. Na ta način je zagotovljena neodvisnost rezultata v opazovanem prečnem profilu od natočnih in iztočnih razmer.



Slika 3.1: Prečni prerez obravnavanega asimetričnega sestavljenega kanala.

Figure 3.1: Cross section of the asymmetric compound channel.

Vzdolžni padec kanala je bil v obeh modelih enak, in sicer $S_0 = 0,00099$. Z meritvami Bousmarja na fizičnem modelu so bili primerjani izračuni treh primerov toka v kanalu, njihove karakteristike so prikazane v preglednici 3.1

V prvi fazi smo račune izvršili z matematičnim modelom PCFLOW2D. Uporabili in med seboj primerjali smo vse tri v matematični model vgrajene modele turbulence: model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti, model Smagorinsky in $k - \varepsilon$ model turbulence.

Uporabili smo enakomerno numerično mrežo, ki je imela v prečni smeri x 82 celic dimenzije $\Delta x = 1,0$ cm, v vzdolžni smeri y pa 402 celici dimenzije $\Delta y = 5,0$ cm.

Preglednica 3.1: Analizirani pretoki in globine vode v sestavljenem kanalu.

Table 3.1: Analyzed discharges and water depths in the compound channel.

Primer	Pretok Q (l/s)	Globina vode v strugi h_m (mm)	Globina vode na poplavnem področju h_f (mm)	Relativna globina vode na poplavnem področju $h_r = h_f / h_m$
Kanal 1	10,0	63,9	13,9	0,22
Kanal 2	12,0	68,8	18,8	0,27
Kanal 3	15,9	78,9	28,9	0,37

V drugi fazi smo izvršili enake simulacije s programsko opremo MIKE (DHI, 2012). Računi so bili izvršeni na dva načina in sicer s polnim 2D matematičnim modelom MIKE 21 ter s kombiniranim modelom MIKE FLOOD, ki združuje 1D račun v glavni strugi z 2D računom na poplavnem področju. Uporabili smo oba modela turbulence, ki sta v programu na voljo, in sicer model turbulence s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti in model Smagorinsky. Kompleksnejši model z dvema dodatnima transportnima enačbama $k - \varepsilon$ žal ni vgrajen v programski paket MIKE. Pri obeh načinih računa (MIKE 21 in MIKE FLOOD) je bila uporabljena enaka numerična mreža kot pri izračunih s PCFLOW2D.

3.2 Izračuni s programom PCFLOW2D

Za zagotovitev numerične stabilnosti in konvergence smo uporabili časovni korak računa $\Delta t = 0,1$ s. Ob izbranem maksimalnem času računa $t_{max} = 3600$ s to pomeni 36000 časovnih korakov. Znotraj enega časovnega koraka je bila upoštevana omejitev največjega števila iteracij na 70, vendar se je število iteracij ob konvergenci rezultatov proti stalnemu toku tekom simulacije zmanjšalo vse do 1 iteracije. Dovoljena relativna napaka znotraj časovnega koraka je bila 0,1 %.

3.2.1 Začetni in robni pogoji

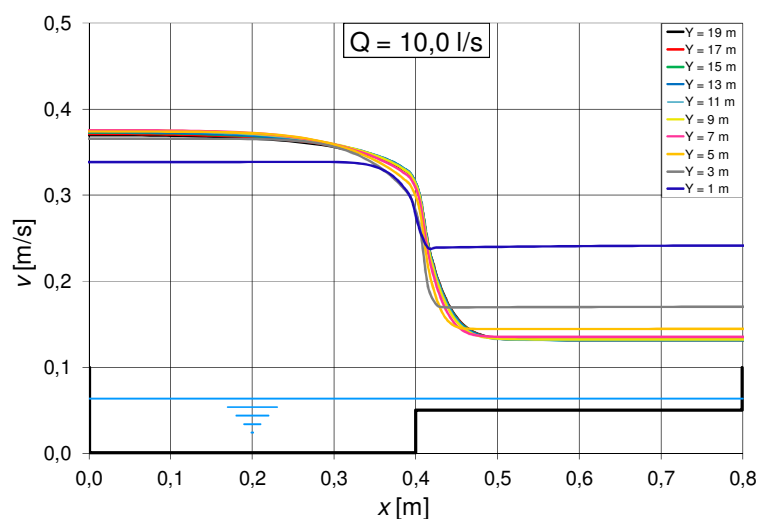
Vsi izvedeni računi so simulirali stalni tok, kakršen je bil tudi na fizičnem modelu. Zgornji robni pogoj je predstavljal po prečnem prerezu enakomerno razporejen konstanten pretok Q (enakomerna vzdolžna hitrost v ter prečna hitrost $u = 0$). Spodnji robni pogoj je v programu podan kot pretočna krivulja, ki je bila konstruirana iz podatkov o pretoku in pripadajočih globinah, podanih v preglednici 3.1. Ob bočnih stenah kanala je bila vzdolž računskega odseka predpisana prečna hitrost u enaka 0. Razporeditev vzdolžne hitrosti ob stenah je opisoval poenostavljen pogoj drseče vrednosti $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$. Fizikalno pravilnejši opis vzdolžne hitrosti ob stenah sicer daje logaritemski zakon, ki pa ga je v programu PCFLOW2D možno uporabiti le pri izračunih s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. Zaradi primerljivosti rezultatov simulacij z različnimi modeli turbulence in zaradi dejstva, da nas je zanimalo predvsem dogajanje na meji med strugo in poplavnim področjem, ne pa ob stenah kanala, je bil pri vseh izračunih uporabljen enak pogoj drseče vrednosti.

3.2.2 Umerjanje modela

Enakomerne tokovne razmere v kanalu s poplavno površino je zagotavljala konstantna globina vode vzdolž kanala. Zato je bilo treba umeriti matematični model oziroma določiti Manningov koeficient hrapavosti, pri katerem se pojavijo takšna gladinska stanja. Umerjanje smo izvršili ob uporabi $k - \varepsilon$ modela turbulence. Umerjena vrednost Manningovega koeficienta hrapavosti je znašala $n_g = 0,0132 \text{ s m}^{-1/3}$, kar se ujema s podatki iz literature za gladko površino, kakršno je predstavljal gladko prevlečen vezan les na fizičnem modelu.

3.2.3 Rezultati modela in primerjava z meritvami na fizičnem modelu

Najprej smo preverili, ali se v kanalu vzpostavijo tokovne razmere, ki so neodvisne od robnih pogojev. Na zgornjem robu je namreč podana enakomerna vstopna hitrost po prečnem prerezu, kar seveda ni fizikalno pravilno. Zato se na prvih nekaj metrih modela vzpostavlja enakomerna hitrostna slika in rezultati s tega prehodnega dela modela niso primerni za primerjavo. Za primer kanala 1, izračunanega s $k - \varepsilon$ modelom turbulence, je na sliki 3.2 prikazana razporeditev vzdolžne komponente hitrosti po prečnem preseku na različnih stacionažah vzdolž modela.



Slika 3.2: Vzdolžna komponenta hitrosti v v prečnem prerezu sestavljenega kanala s poplavno površino pri različnih stacionažah.

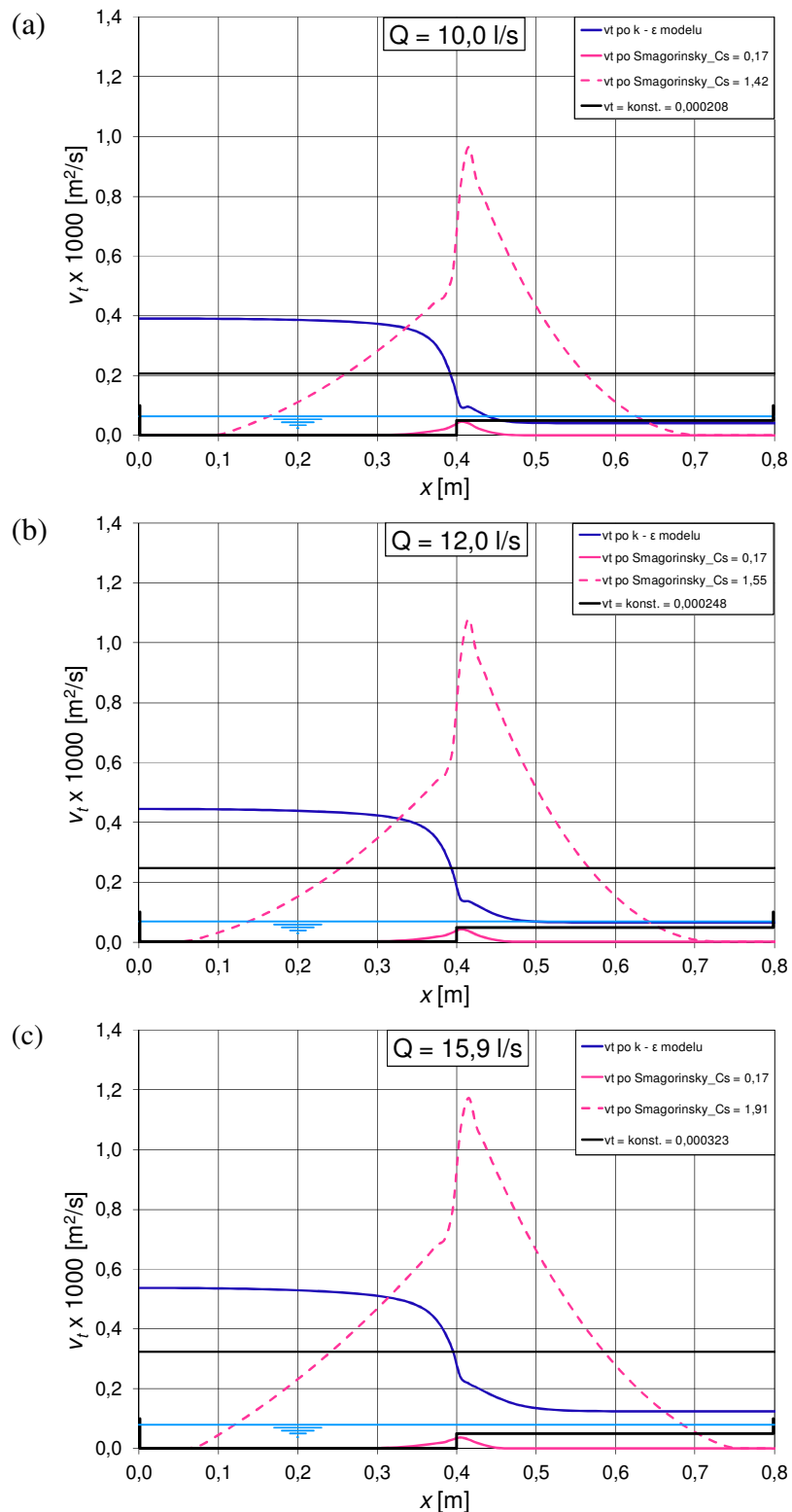
Figure 3.2: Longitudinal velocity component v in the cross section of the asymmetric compound channel at different stationing.

Vidimo lahko, da se v kanalu šele po približno 7 m vzpostavijo enakomerne tokovne razmere, ki so neodvisne od dotočnih in odtočnih razmer. Do podobnih zaključkov je prišel pri svojem delu na fizičnem modelu tudi Bousmar (2002), zato se rezultati njegovih meritev nanašajo na stacionažo $y = 7 \text{ m}$ od začetka modela. Pri izračunih z matematičnim modelom prostorske omejitve ni bilo (20 m dolg matematični model), zato se naši rezultati izračunov nanašajo na stacionažo $y = 15 \text{ m}$, kjer zagotovo ni vpliva dotočnih razmer.

3.2.3.1 Koeficient turbulentne viskoznosti

Na razpored hitrosti in posledično izmenjavo vode med glavno strugo in poplavnim področjem v veliki meri vpliva turbulenca. V uporabljenem matematičnem modelu PCFLOW2D je modeliranje turbulence osnovano na predpostavki o turbulentni viskoznosti, zato ima njeno modeliranje velik vpliv na rezultate. V PCFLOW2D je vgrajen le en model turbulence, in sicer model $k - \varepsilon$, ki za veliko vrst različnih turbulentnih tokov sam po sebi ne potrebuje dodatnega umerjanja, saj se velikost turbulentnih količin izračuna z dodatnima transportnima enačbama (Rodi 1993). Potrebno je poudariti, da je matematični model seveda treba umeriti na meritve (Manningov koeficient hrapavosti n_g), umerjati ni potrebno zgolj modela turbulence, s katerim se izračuna vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t . Pred uporabo preostalih dveh modelov turbulence, modela s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti in modela Smagorinsky, moramo namreč poznati vrednosti samega koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t oziroma koeficienta Smagorinskega C_s . Zaradi medsebojne primerljivosti rezultatov uporabljenih modelov turbulence in še posebej vpliva različne razporeditve koeficienta turbulentne viskoznosti v prečnem profilu na razpored hitrosti na meji med strugo in poplavnim področjem so bile najprej izvršene simulacije s $k - \varepsilon$ modelom turbulence, na podlagi tako izračunanih vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t pa smo umerili preostala dva uporabljena modela turbulence. Ob uporabi modela s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti smo uporabili takšno vrednost ν_t , kot znaša povprečna vrednost $\bar{\nu}_t$, izračunana s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. Pri izračunih z modelom Smagorinsky smo vrednost koeficienta Smagorinskega C_s umerili tako, da smo dobili takšno povprečno vrednost koeficienta $\bar{\nu}_t$, kot je bila izračunana s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. Razpored izračunane vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti je za vse tri obravnavane pretoke prikazan na sliki 3.3.

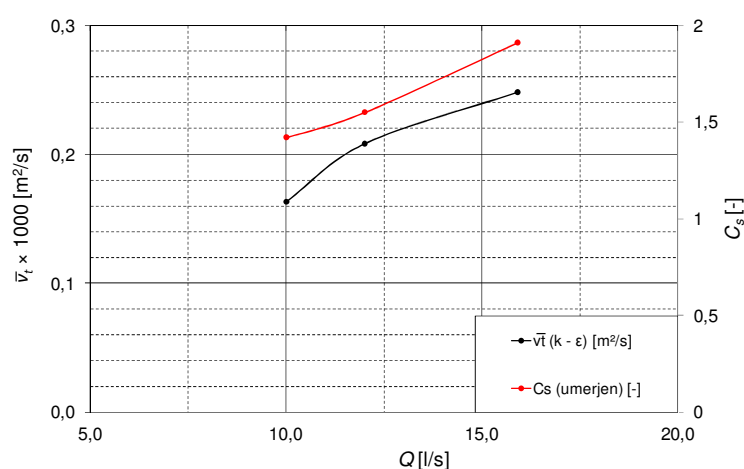
Preverili smo tudi, kakšne rezultate dobimo ob uporabi drugačnih vrednosti koeficientov ν_t in C_s . Uporaba pravih vrednosti koeficientov ν_t in C_s je ključnega pomena. V navodilih za uporabo nekaterih komercialnih programov, kot na primer MIKE (DHI, 2012), CCHE2D (Jia in Wang, 2001) in POM (Mellor, 2004), se pri uporabi modela turbulence Smagorinsky priporoča kar standardne ali nekoliko modificirane vrednosti $0,10 < C_s < 0,24$ (v programskem paketu MIKE je priporočena vrednost koeficienta znotraj intervala $0,25 < C_s < 1,0$), ki se uporabljajo pri modeliranju turbulence na podmrežnem merilu, čeprav se model turbulence Smagorinsky v omenjenih primerih uporablja za izračun celotnega spektra turbulence. Uporaba standardnih vrednosti C_s pa lahko v nekaterih primerih vodi do precej napačnih rezultatov, kar bo pokazano v nadaljevanju. S tem namenom smo naredili izračune tudi s pogosto priporočeno vrednostjo koeficienta $C_s = 0,17$. Izračunane vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t z modelom Smagorinsky pri uporabljeni priporočeni vrednosti koeficienta C_s so prikazane na sliki 3.3. Detajlna analiza modela Smagorinsky je opisana v poglavju 7.4.3.2.



Slika 3.3: Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti v_t , pomnožena s 1000, v prečnem prerezu kanala s poplavno površino ob uporabi različnih modelov turbulence; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti, model Smagorinsky in $k-\epsilon$ model turbulence.

Figure 3.3: Values of eddy viscosity coefficient v_t , multiplied by 1000, in the cross section of the asymmetric compound channel, using different turbulence models; constant viscosity model, Smagorinsky model and $k-\epsilon$ model.

Vidimo lahko, da se z različnimi modeli izračunane vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti med seboj znatno razlikujejo. Medtem ko je pri modelu s konstantno vrednostjo le-ta seveda konstantna, pa daje $k-\varepsilon$ model turbulence nekajkrat večje vrednosti koeficienta ν_t v strugi kot na poplavnem področju. Model Smagorinsky izračuna največje vrednosti ν_t na meji med strugo in poplavnim področjem, ob obeh straneh kanala pa je vrednost koeficienta ν_t zanemarljivo majhna. V primeru uporabe priporočene vrednosti koeficienta $C_s = 0,17$ so tudi največje izračunane vrednosti veliko manjše od povprečne izračunane vrednosti $\bar{\nu}_t$, izračunane s $k-\varepsilon$ modelom turbulence. Z oddaljenostjo od omenjene meje vrednost ν_t hitro pada k zanemarljivi vrednosti blizu 0. Podoben razpored ν_t dobimo tudi ob uporabi umerjene vrednosti C_s , le da so v tem primeru največje vrednosti koeficienta ν_t veliko višje in močno presegajo najvišje izračunane vrednosti s $k-\varepsilon$ modelom turbulence.



Slika 3.4: Odvisnost povprečne vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$, izračunane s $k-\varepsilon$ modelom turbulence, pomnožene s 1000, ter pripadajoče umerjene vrednosti koeficienta Smagorinsky C_s od pretoka.

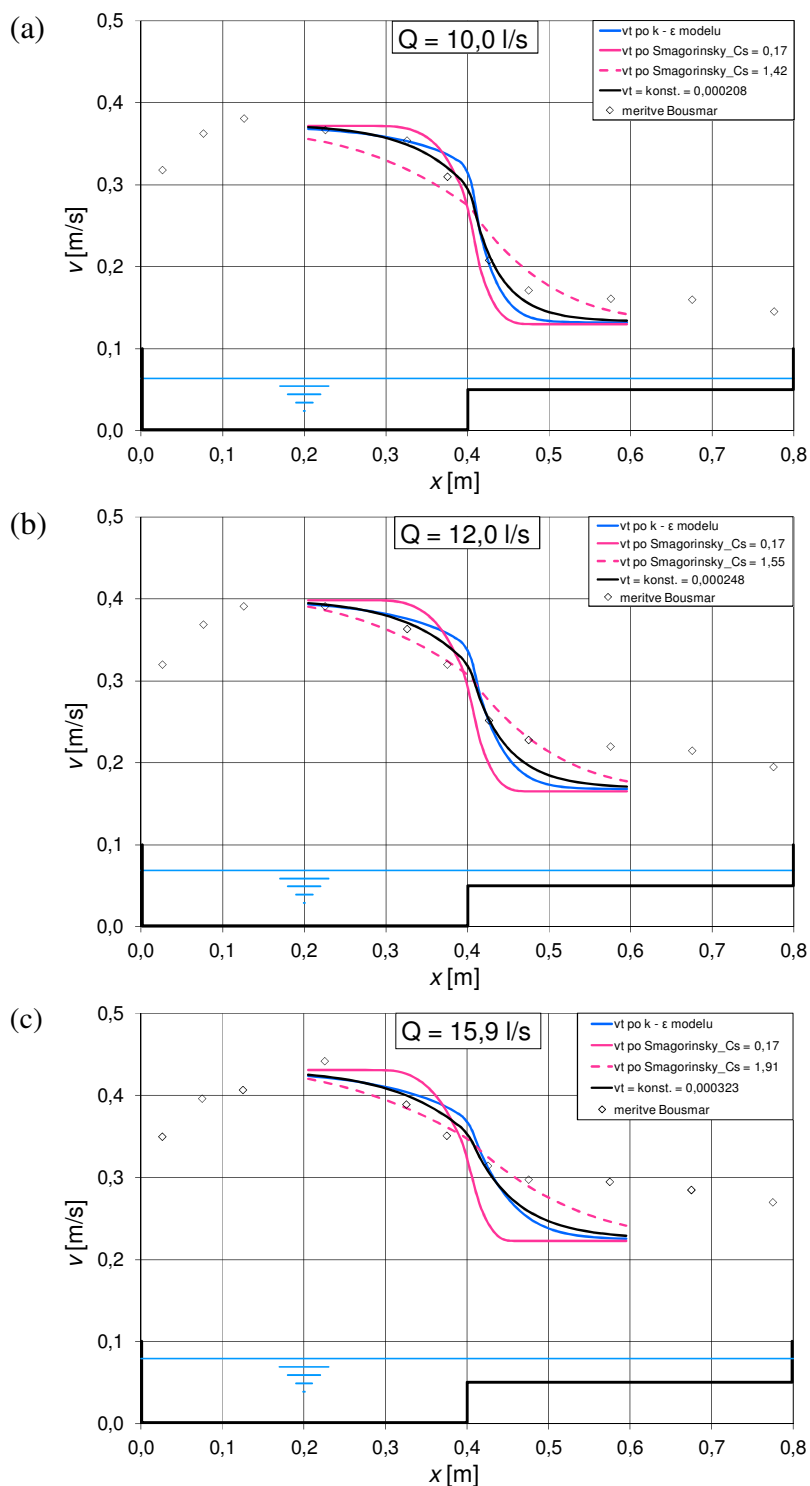
Figure 3.4: The dependence of the average value of the eddy viscosity $\bar{\nu}_t$ calculated with the $k-\varepsilon$ turbulence model, multiplied by 1000, and the corresponding calibrated values of the Smagorinsky coefficient C_s on the discharge.

Kot je opisano že v poglavju 2.3.3, je koeficient turbulentne viskoznosti odvisen od toka in se razlikuje že pri enaki geometriji ob različnem pretoku. V obravnavanem primeru se s $k-\varepsilon$ modelom turbulence izračunane povprečne vrednosti $\bar{\nu}_t$ z večanjem pretoka povečujejo (slika 3.4). Za vsak posamezen primer se spremeni tudi umerjena vrednost koeficienta Smagorinskega C_s , ki prav tako narašča z večanjem pretoka (slika 3.4). V praksi to pomeni, da moramo za vsak tok, v katerem želimo natančno simulirati vpliv turbulence, poznati pripadajočo vrednost C_s (ali povprečno vrednost $\bar{\nu}_t$ ob uporabi modela s konstantno vrednostjo ν_t). Zato je v takšnih primerih uporaba modelov turbulence, pri katerih je potrebno določene konstante predhodno umeriti, ob nepoznavanju detajlnih lastnosti toka lahko zelo problematična.

3.2.3.2 Hitrostni profil

Razlike med rezultati različnih modelov turbulence se pokažejo v izračunani hitrostni sliki. Z opisanimi in v PCFLOW2D vgrajenimi modeli turbulence izračunana vzdolžna komponenta hitrosti v

je v prečnem prerezu v stacionaži $y = 15$ m prikazana na sliki 3.5. Zaradi uporabe poenostavljenega robnega pogoja ob steni (poglavje 3.2.1), ki ne simulira pravilno dejanskega padca hitrosti ob steni, je predstavljena primerjava izračunanih hitrosti z različnimi modeli turbulence omejena na za nas zanimivo mejno območje med strugo in poplavnim področjem.



Slika 3.5: Primerjava z različnimi modeli turbulence izračunanih in izmerjenih vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v v prečnem prerezu kanala s poplavno površino pri različnih pretokih.

Figure 3.5: Comparison of calculated (using different turbulence models) and measured values of the longitudinal velocity component v at the compound channel cross-section at different discharges.

Prva ugotovitev, do katere lahko pridemo s primerjavo rezultatov, prikazanih na sliki 3.5 je, da so izračunane vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v izven mejnega območja med strugo in poplavnim področjem praktično enake pri vseh uporabljenih modelih turbulence. Uporabljen model turbulence pričakovano vpliva na izračunano hitrostno sliko le na meji med glavno strugo in poplavnim področjem, saj se na tem mestu razvije najintenzivnejša turbulenca in je njeno pravilno modeliranje pomembno. Medtem ko se izračunane maksimalne hitrosti v strugi dobro ujemajo z meritvami Bousmarja (2002) na fizičnem modelu (maksimalno odstopanje $\Delta v = 0,012$ m/s), pa so izračunane vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v na poplavni površini, predvsem pri največjem pretoku 15,9 l/s, podcenjene (max. $\Delta v = 0,072$ m/s).

V preglednici 3.2 so prikazane s $k - \varepsilon$ modelom turbulence izračunane hitrosti vode v strugi in na poplavnem področju. Vidimo, da je z večanjem pretoka povečanje hitrosti v strugi v primerjavi s povečanjem hitrosti na poplavni površini manjše. Pri nadaljnjem naraščanju pretoka bi bil gradient hitrosti med strugo in poplavnim področjem še manjši. V takšnih pogojih se oblikuje en sam tok po celotni širini kanala, interakcija zaradi počasneje tekoče vode po poplavnem področju in hitrejše vode v strugi pa zbledi. Pojavijo se sekundarni tokovi v prečnem prerezu, ki pa nimajo tolikšnega vpliva na prenos energije med strugo in poplavnimi področji kot horizontalni vrtinci, ki so posledica velikega gradienta vzdolžnih hitrosti v prečni smeri (Bousmar, 2002).

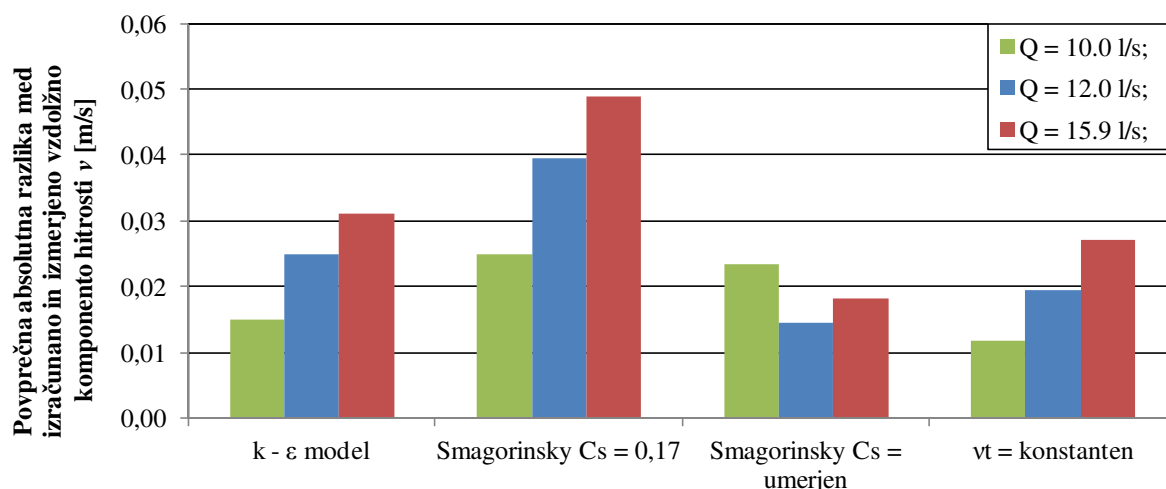
Preglednica 3.2: Izračunane hitrosti vode v sestavljenem kanalu.

Table 3.2: Calculated flow velocities in the compound channel.

Primer	Pretok Q (l/s)	Hitrost vode v strugi v_m (m/s)	Hitrost vode na poplavnem področju v_f (m/s)	Relativna hitrost vode na poplavnem področju $v_r = v_f / v_m$
Kanal 1	10,0	0,372	0,132	0,355
Kanal 2	12,0	0,398	0,168	0,422
Kanal 3	15,9	0,430	0,225	0,523

Opravili smo numerično analizo ujemanja izračunov z meritvami po metodi absolutnih razlik. Na sliki 3.6 je za posamezen izračun prikazano povprečno odstopanje izračunane vrednosti od merjene vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v . Analiza je pokazala, da na meji med strugo in poplavnim področjem dobimo najboljše ujemanje z izmerjenimi hitrostmi ob uporabi modela turbulence s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti ($\Delta \bar{v} = 0,019$ m/s). Seveda mora biti vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t prava za obravnavano vrsto toka. Opravili smo namreč tudi izračune z drugačnimi vrednostmi koeficienta ν_t , ki so dali rezultate, ki precej odstopajo od meritev na fizičnem modelu. Kot je bilo že omenjeno, pa v praksi ustrezne vrednosti koeficienta ν_t ne poznamo vnaprej, zato je navadno primerneje uporabiti kompleksnejši $k - \varepsilon$ model turbulence, ki ne potrebuje predhodnega umerjanja za vsak obravnavan primer posebej. Rezultati $k - \varepsilon$ modela se namreč ravno tako razmeroma dobro ujemajo z meritvami na fizičnem modelu ($\Delta \bar{v} = 0,024$ m/s). Najpomembnejša

razlika med rezultati modela s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti in $k - \varepsilon$ modela nastopi v strugi tik ob meji s poplavnim področjem, kjer $k - \varepsilon$ model napove prevelike hitrosti.



Slika 3.6: Analiza ujemanja z različnimi modeli turbulence izračunanih in izmerjenih vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v po metodi absolutnih razlik v prečnem prerezu kanala s poplavno površino pri različnih pretokih.

Figure 3.6: Matching analysis of the calculated (using different turbulence models) and measured values of the longitudinal velocity component v with the method of absolute differences at compound channel cross-section at different discharges.

Kot je bilo pričakovati že iz primerjave izračunanih vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti, daje model Smagorinsky ob uporabljeni priporočeni vrednosti koeficienta Smagorinskega $C_s = 0,17$ precej drugačno hitrostno sliko. Ker so izračunane vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti majhne, z odmikom od meje med glavno strugo in poplavnim področjem pa hitro padajo proti 0, je gradient hitrosti na omenjeni meji (pre)velik. Nizke vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti namreč pomenijo nizko stopnjo turbulence in s tem majhen prenos kinetične energije iz struge na poplavno področje. Čeprav opravljena analiza ujemanja izračuna z meritvami po metodi absolutnih razlik za primere z umerjeno vrednostjo koeficienta Smagorinskega C_s kaže na dobro ujemanje ($\Delta \bar{v} = 0,019$ m/s), pa grafična primerjava vzdolžne komponente hitrosti v na sliki 3.5 kaže, da je tako izračunan hitrostni profil preveč izravnal. Zaradi prevelikih izračunanih vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti na meji med strugo in poplavnim področjem je gradient hitrosti premajhen.

Čeprav izračuni s $k - \varepsilon$ modelom turbulence potrebujejo nekaj več računskega časa, lahko brez detajlnega umerjanja samega modela turbulence za vsak obravnavan primer posebej, kakor je potrebno pri preostalih dveh uporabljenih modelih turbulence brez dodatnih transportnih enačb, pridemo do uporabnih rezultatov. Takšno umerjanje modela turbulence namreč lahko pomeni precej dodatnih izračunov, za katere je potrebno več skupnega časa, kot ga prihranimo z večjo hitrostjo posameznega izračuna.

3.3 Izračuni s programom MIKE

Na primeru toka v kanalu s sestavljenim prerezom smo želeli predvsem podati primerjavo rezultatov med modeloma MIKE 21 in MIKE FLOOD, ki deluje na drugačnem principu kot polni 2D model PCFLOW2D. MIKE 21 je polni dvodimenzionalni model, pri kombiniranem modelu MIKE FLOOD pa je glavna struga modelirana z enodimenzionalnim modelom MIKE 11, poplavno področje pa z dvodimenzionalnim modelom MIKE 21.

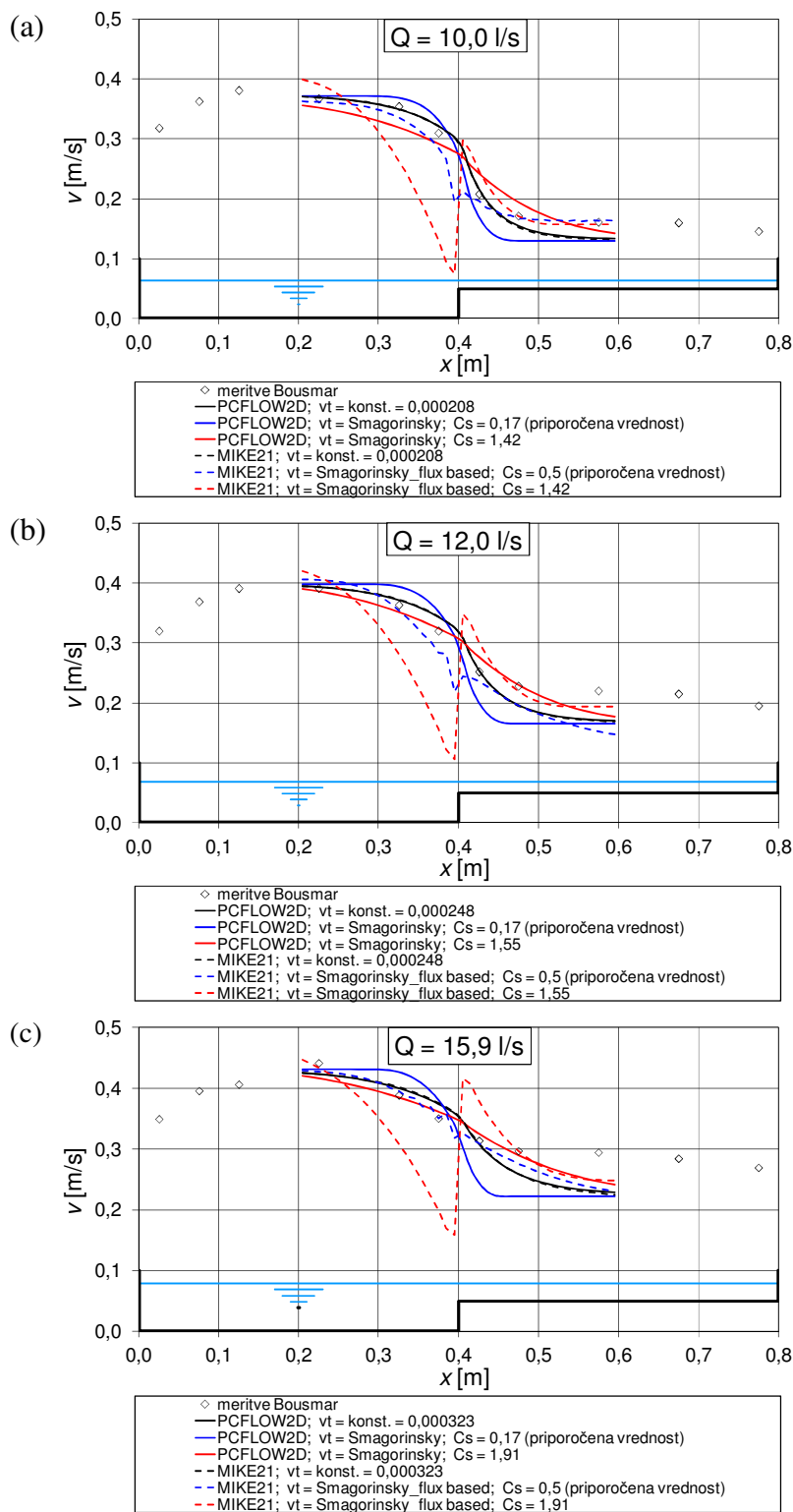
3.3.1 MIKE21

Pri izračunih z modelom MIKE 21 smo uporabili popolnoma enake karakteristike kot pri izračunih z modelom PCFLOW2D (geometrija, robni pogoji, velikost računskih celic). Na ta način je bila mogoča korektna primerjava med rezultati obeh modelov. Zaradi težav s stabilnostjo je bilo potrebno uporabiti manjši časovni korak računa $\Delta t = 0,01$ s. Kljub 10x manjšemu časovnemu koraku so bile simulacije izvršene v približno polovici časa, potrebnega za simulacijo z modelom PCFLOW2D. Razlika gre na račun vgrajene numerike reševanja diferencialnih enačb, ki je v modelu MIKE 21 hitrejša. Kot bomo videli v nadaljevanju, pa se morda prav zato pojavijo problemi s stabilnostjo računa.

Kot je bilo že omenjeno sta v MIKE 21 vgrajena dva modela turbulence, in sicer model turbulence s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti in model Smagorinsky. Model Smagorinsky lahko temelji na gradientu hitrosti ali pa na gradientu pretoka. Kot je opisano v navodilih (DHI, 2012b) je pravilnejši pristop tisti, ki temelji na gradientu hitrosti, vendar je račun stabilnejši pri uporabi pristopa, ki temelji na gradientu pretoka. V modelu v osnovnih Reynoldsovih povprečenih Navier-Stokesovih enačbah namreč nastopata specifična pretoka v obeh smereh in ne komponenti hitrosti. Zato se pri modelu Smagorinskega, ki temelji na gradientu hitrosti, uporabi preračunani hitrosti iz prejšnjega časovnega koraka, kar bi lahko bil vzrok za že omenjeni stabilnostni problem. V našem primeru smo v računih uporabili model Smagorinskega, ki temelji na gradientu pretoka. V navodilih za uporabo programa je navedena priporočena vrednost koeficienta Smagorinskega C_s znotraj intervala $0,25 < C_s < 1,0$.

Medtem ko se hitrosti, izračunane z modelom turbulence s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti, pričakovano ujemajo s primerljivimi rezultati izračuna z modelom PCFLOW2D, pa se pri uporabljenem modelu Smagorinsky pojavijo pomembne razlike (slika 3.7). Izračuni s priporočeno vrednostjo koeficienta Smagorinskega $C_s = 0,5$ so, kljub stacionarnim robnim pogojem (dotok $Q = \text{konstanten}$ in $h_{out} = \text{konstantna}$), nestacionarni. Izračunane vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v , ki jih prikazuje slika 3.7, se ob uporabi priporočene vrednosti $C_s = 0,5$ močno spreminjajo v vsakem časovnem koraku. To je posledica numerične nestabilnosti, ki verjetno izvira iz načina računa koeficienta Smagorinskega, ki upošteva gradiente hitrosti iz prejšnjega časovnega koraka. Računi z umerjeno vrednostjo C_s dajejo stacionarne rezultate, ki pa zelo odstopajo od ostalih izračunov in meritev na fizičnem modelu. Primerjave med rezultati izračunov z modelom Smagorinsky, ki temelji na fizikalno pravilnejšem pristopu gradienta hitrosti in rezultati izračunov z

matematičnim modelom PCFLOW2D, zaradi omenjenih stabilnostnih problemov pri programu MIKE 21 za obravnavani primer ni bilo mogoče izvesti.



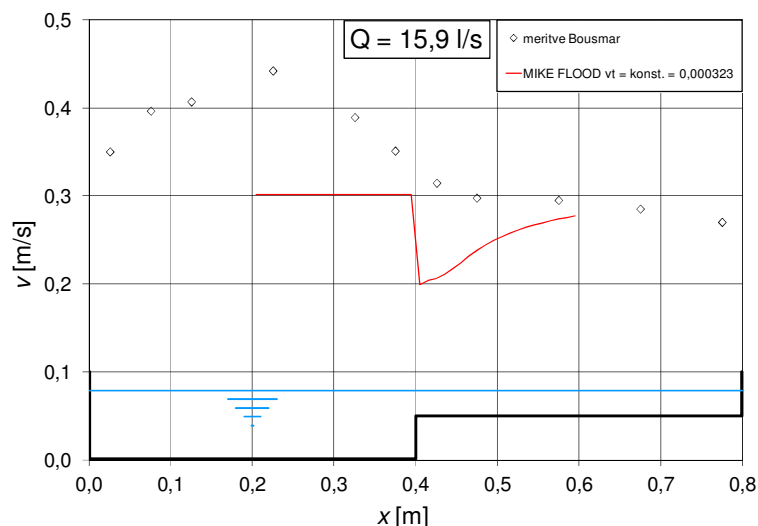
Slika 3.7: Primerjava med rezultati izračunov z matematičnima modeloma PCFLOW2D in MIKE 21. Prikazane so izračunane in izmerjene vrednosti vzdolžne komponente hitrosti v v prečnem prerezu kanala s poplavno površino pri različnih pretokih.

Figure 3.7: Comparison between the results of calculations with mathematical models PCFLOW2D and MIKE 21. Calculated and measured values of the longitudinal velocity component v at compound channel cross-section at different discharges are shown.

Zaključimo lahko, da so rezultati izračunov z modelom turbulence s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti pričakovano skoraj identični primerljivim rezultatom izračunov z modelom PCFLOW2D. Ujemanje teh rezultatov z meritvami na fizičnem modelu je na mejnem območju med strugo in poplavnim področjem dobro. Dobro je simuliran gradient hitrosti, nekoliko slabše je ujemanje pri hitrostih na poplavnem področju. Pomemben problem pri uporabi omenjenega modela turbulence je le v tem, da za posamezen primer toka vnaprej ne poznamo vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , ob uporabi napačnih vrednosti pa so rezultati takšnih izračunov slabi. Za obravnavani enostavni primer toka v kanalu s sestavljenim prerezom se je izkazalo, da z vgrajenim modelom turbulence Smagorinsky ne moremo dobiti rezultatov, ki bi se dovolj dobro prilegali meritvam. Model MIKE 21 je zato manj primeren za simulacijo tokov, kjer je vpliv turbulence velik, razen če že vnaprej poznamo natančno prostorsko razporeditev vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti (ali pa vsaj njene povprečne vrednosti), kar pa je v praksi težko.

3.3.2 MIKE FLOOD

Zaradi omenjenih težav oziroma netočnih rezultatov izračunov ob uporabi modela turbulence Smagorinsky, smo pri simulacijah z modelom MIKE FLOOD uporabili enostavnejši in bolj robusten model turbulence s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti. Izkazalo se je, da je model izjemno občutljiv na najmanjšo spremembo vhodnih parametrov. Tu mislimo predvsem na definicijo robnih pogojev. Izračun, ko so robni pogoji definirani hkrati na 2D poplavnem področju in 1D strugi, daje do neke mere logičen razpored hitrosti na poplavnem področju (velikost vzdolžne komponente hitrosti v pada v prečni smeri od struge proti robu kanala), vendar so rezultati izjemno nestacionarni in zato neuporabni. Zaradi stabilnosti izračunov se navadno 2D poplavno področje umetno podaljša z 1D modelom, kjer se tudi definira spodnji robni pogoj. V tem primeru smo dobili stacionarne rezultate, ki pa niso niti enakomerni po stacionaži, niti niso logični. Izračunana velikost vzdolžne komponente hitrosti v je v tem primeru najmanjša prav na meji med strugo in poplavnim področjem, globlje na poplavnem področju pa naraste (slika 3.8).



Slika 3.8: Z modelom MIKE FLOOD izračunana vzdolžna komponenta hitrosti v v prečnem prerezu sestavljenega kanala s poplavno površino v stacionaži $y = 15 \text{ m}$.

Figure 3.8: Longitudinal velocity component v in the cross section of the asymmetric compound channel at station $y = 15 \text{ m}$ calculated with mathematical model MIKE FLOOD.

Navkljub vloženim velikim naporom nam z modelom MIKE FLOOD ni uspelo dobiti uporabnih rezultatov. Eden od možnih razlogov za opisane težave bi bil lahko v tem, da je program prilagojen za modeliranje veliko večjih območij od obravnavanega v našem primeru. Čeprav je program dokaj dobro podprt z navodili za uporabo in ostalo znanstveno dokumentacijo, pa samo jedro numeričnega reševanja ni dovolj podrobno opisano, zato lahko o razlogih za opisane težave samo ugibamo. Prav zaprta koda je marsikdaj težava komercialnih programov, saj si modelarji pogosto želimo bodisi pogledati v samo jedro programa bodisi program dopolniti glede na svoje potrebe.

Opravljeni numerični izračuni toka v kanalu enostavne oblike so pokazali, da je potrebno biti pri matematičnem modeliranju izredno previden. Zelo pomembno je ustrezno umerjanje in verifikacija matematičnega modela ter pravilna interpretacija in inženirska presoja pridobljenih rezultatov.

4 POVZEMANJE REZULTATOV S FIZIČNEGA MODELA BREŽICE

Za primer praktične uporabe modeliranja toka v rekah s poplavnimi področji smo izbrali območje nad načrtovano HE Brežice, za katerega je bil v letu 2008 izdelan fizični model. V fazi načrtovanja HE Brežice je bilo potrebno preveriti in zagotoviti bolj oz. vsaj enako ugoden odtočni režim pod HE ter hkrati zagotoviti, da se poplavna varnost v okolici gorvodno ležeče Nuklearne elektrarne Krško (NEK) ne poslabša. Z namenom doseganja večjega zaupanja v rezultate se je pristopilo k izvedbi hibridnih hidravličnih modelov. Tak pristop združuje prednosti obeh načinov modeliranja, fizičnega in matematičnega. V tem poglavju predstavljamo izsledke raziskav, povzete po vmesnem poročilu o raziskavah na fizičnem hidravličnem modelu, ki smo jih kasneje uporabili pri umerjanju matematičnega modela PCFLOW2D (Rodič in sod., 2010). Poudariti je potrebno, da gre za vmesno poročilo nekega presečnega stanja na fizičnem modelu, zato tukaj predstavljeni rezultati niso namenjeni splošni rabi. V tem poglavju predstavljeni rezultati fizičnega modela služijo zgolj kot praktični študijski primer za podrobno analiziranje parametrov matematičnega modela.

4.1 Opis modela

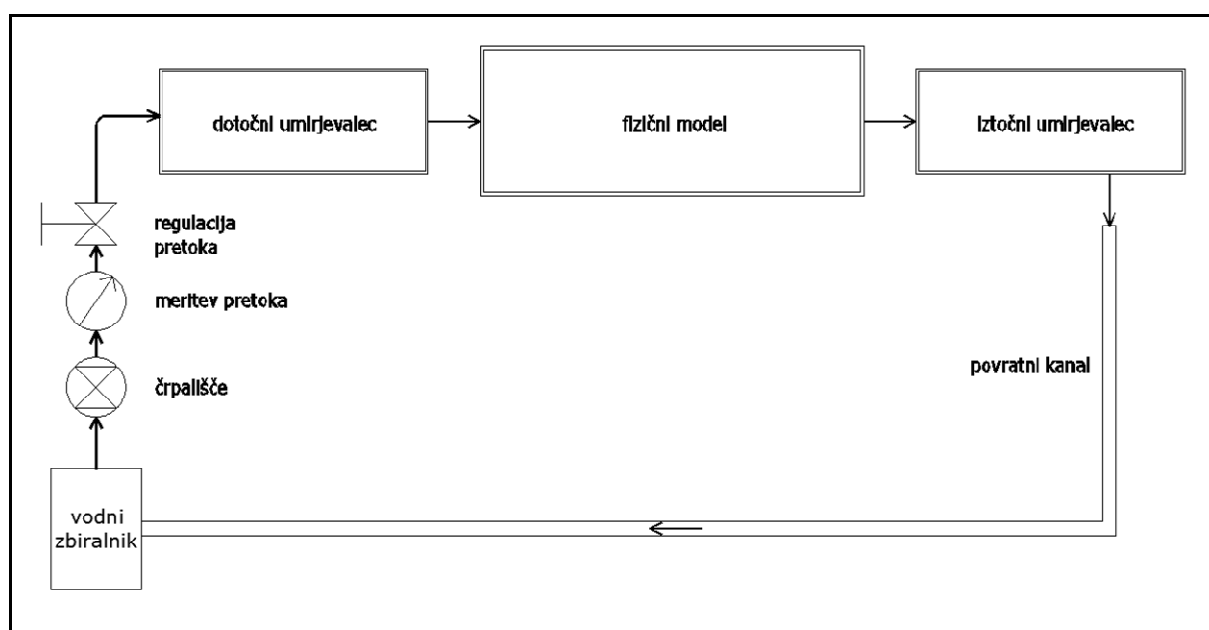
Fizični hidravlični model vplivnega območja HE Brežice je bil zgrajen na zunanjem delu preizkuševališča Inštituta za hidravlične raziskave v distorziranem merilu 1:125/62,5 in obsega območje reke Save od Krškega (od rečnega profila P105 s stacionažo km 748+062) do Brežic (do rečnega profila P131 s stacionažo km 737+257), skupaj s pripadajočimi poplavnimi področji na levi in na desni strani struge (**Priloga A.1**). Dolžina modelirane rečne struge znaša v naravi 10,8 km oz. na modelu 86,6 m. Obseg poplavnih področij je omejen glede na prostorske možnosti, vendar so zajeta vsa področja, ki aktivno sodelujejo pri prevajanju vode v času poplav. Kot je bilo že omenjeno, se na območju modela nahaja tudi NEK, zato je bil v model vgrajen natančen posnetek jezu NEK skupaj z vtočnim kanalom v črpališče ter obstoječimi protipoplavnimi nasipi gorvodno in dolvodno od NEK.



Slika 4.1: Digitalni ortofoto posnetek modeliranega vplivnega območja HE Brežice na fizičnem hidravličnem modelu.

Figure 4.1: Digital satellite image of modeled area of HPP Brežice on the physical hydraulic model.

Površina modeliranega območja znaša v naravi 23,4 km² oz. na modelu 1499 m². Fizični model je bil zgrajen na podlagi natančnega geodetskega posnetka obravnavanega področja s sistemom LIDAR (iz leta 2007) ter klasičnih geodetskih posnetkov rečnih profilov (prav tako iz leta 2007). Na podlagi teh geodetskih podatkov so bili izdelani prečni profili, ki so na modelu v medsebojni razdalji 2,5 m, kar pomeni 312,5 m v naravi. Fizični model območja HE Brežice je prikazan na fotografiji v **prilogi A.2**. Shematski prikaz fizičnega hidravličnega modela je prikazan na sliki 4.2.



Slika 4.2: Shematski prikaz fizičnega hidravličnega modela območja HE Brežice.

Figure 4.2: Schematic diagram of the physical hydraulic model of the area of HPP Brežice.

4.2 Modelno merilo

Pri fizičnem modelu narekuje modelno merilo dolžin predvsem nabor hidravličnih parametrov, ki predstavljajo načrtovani rezultat raziskave, velikost prostora, kapacitete instalacij idr., merilo višin pa še dodatno sile površinske napetosti, viskoznosti idr., ki omejujejo modeliranje pri premajhnih globinah vodnega toka. Tako je bila na Inštitutu za hidravlične raziskave v okviru tehnoloških in gradbenih načrtov modela izvedena analiza modelnega merila. Izkazalo se je, da je za obravnavanje tako obširnega območja vodotoka in poplavnih površin nujna izbira ti. distorziranega hidravličnega modela, pri katerem imamo različni merili za dolžine $\lambda_L = 125$ in višine $\lambda_V = 62,5$ (faktor distorzije $n = 2$).

Z izbranim modelnim merilom so bile določene vrednosti za prenos modelnih količin v naravo po Froudovi modelni podobnosti:

- za dolžino in širino..... $\lambda_L = 125$
- za višino..... $\lambda_V = 62,5$
- za površino..... $\lambda_L^2 = 15625$
- za prostornino $\lambda_L^3/n = 976562,5$
- za hitrost $(\lambda_L/n)^{1/2} = 7,91$
- za čas..... $(\lambda_L * n)^{1/2} = 15,81$
- za pretok $\lambda_L^{5/2}/n^{3/2} = 61763,24$
- za absolutno hrapavost $\lambda_L/n^4 = 7,81$

4.3 Merilni sistem

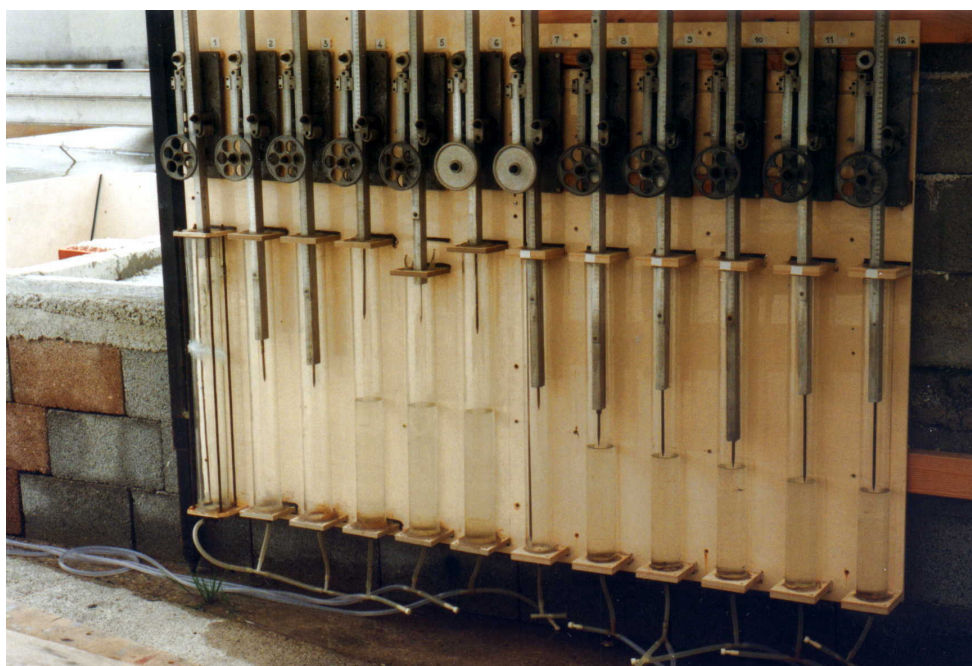
Dovod vode na model je bil speljan z nizkotlačnega ($h = 6$ m) v natočni umirjevalec vode. Dovodni sistem sestavljajo 3 cevovodi $\Phi 250$ mm, ventili za nastavljanje pretoka in merilna mesta za merjenje pretoka. Pretoki vode v dovodnem sistemu so bili merjeni na trikotnih Thompsonovih merilnih jezovih. Standardna merilna negotovost pri 95 % stopnji zaupanja pri meritvi pretoka je znašala največ $\pm 1,50$ %.



Slika 4.3: Trikotni Thompsonov merilni jez.

Figure 4.3: A triangular Thompson's measuring thin-plate weir.

Meritve nivojev gladin so bile izvajane posredno, z merjenjem nivojev gladin z ostnim merilom v steklenih piezometričnih cevkah na merilni harfi. Le-te so bile po principu vezne posode povezane s posameznimi piezometričnimi odprtinami, ki so enakomerno razporejene vzdolž struge (13 piezometrov) ter na poplavnih področjih (26 piezometrov). Odstopanje meritev gladin na modelu je $\pm 0,03$ cm, kar znaša $\pm 1,875$ cm v naravi. Poleg tega so bile na posameznih področjih, kjer so bili zahtevani bolj detajlni podatki, gladine merjene tudi neposredno s pomočjo nivelirja in geodetske late z natančnostjo $\pm 0,1$ mm (6,25 mm v naravi).



Slika 4.4: Ostna merila za meritve gladin na fizičnem hidravličnem modelu.

Figure 4.4: Water level measurements on a physical hydraulic model.

Pri bolj detajlnih opazovanjih toka na ožjem območju so bile izmerjene točkovne hitrosti vode z 2D ultrazvočnim odjemnikom, ki deluje po principu Dopplerjevega efekta (ADV sonda – Acoustic Doppler Velocimeter). Po zagotovilih proizvajalca znaša natančnost meritev do $\pm 1 \%$ merilnega območja, kar je v našem primeru $\pm 1 \text{ cm/s}$ na modelu ($\pm 0,0791 \text{ m/s}$ v naravi),.

Za opazovanje in določevanje poplavnih poti vode vzdolž poplavnih področij smo uporabljali barvilo (hipermangan).

4.4 Umerjanje modela

Vse raziskave, vključno z umerjanjem modela, so bile izvedene v stacionarnih pogojih obratovanja. Kot je bilo omenjeno že v uvodu, so rezultati fizičnega modela povzeti po poročilu (Rodič in sod., 2010):

„Umerjanje modela se je izvedlo za pretoke $1230 \text{ m}^3/\text{s}$ (12. 12. 2008), $1595 \text{ m}^3/\text{s}$ (31. 3. 2009) in $2466 \text{ m}^3/\text{s}$ (19. 9. 2007). Za vse te pretoke so bile namreč na voljo terenske meritve nivojev gladin, nekatere z avtomatskimi merilnimi sondami na stalnih merilnih mestih, druge pa z izmero nivoja gladine v času vrha visokovodnega vala ali tudi kasneje na podlagi sledov vode (predvsem za pretok $2466 \text{ m}^3/\text{s}$). Vrednost pretokov ob posameznem hidrološkem dogodku je bila določena po pretočni krivulji za jezik NEK. Pri pretokih $1230 \text{ m}^3/\text{s}$ in $1595 \text{ m}^3/\text{s}$ reka Sava še ne prestopi bregov, pri pretoku $2466 \text{ m}^3/\text{s}$ pa se je že razlivala v poplavni prostor.

Umerjanje modela oz. rečne struge se je izvajalo s postopnim lepljenjem peska ter primerjanjem s terenskimi meritvami. Uporabljen je pesek granulacije 8-16 mm. Pri terenskem ogledu in meritvah je bilo namreč ugotovljeno, da so sipine tlakovane s kamni reda velikosti 10 cm, čemur na modelu ustreza višina hrap 13 mm.

V tabeli v **prilogi A.3** ter v grafikonih v **grafičnih prilogah A.4** in **A.5** sta prikazana potek gladin za obravnavane pretoke na že umerjenem modelu ter razlika nivojev gladin, izmerjenih na modelu in v naravi. V tabeli in grafični prilogi, kjer je prikazana primerjava meritev na modelu in v naravi, je v profilu NEK obravnavan nivo gladine v črpališču, kjer se izvajajo stalne meritve nivoja gladine, in kjer je bil med drugim izmerjen tudi nivo gladine na modelu. Pri prikazu poteka gladin (grafična **priloga A.4**) pa je v profilu NEK prikazan nivo gladine na sredini struge.

Primerjava nivojev gladin na modelu in v naravi kaže dobro ujemanje gladin. Večje odstopanje se pojavlja na merilnem mestu NEK v črpališču, kjer so bili pri vseh treh obravnavanih pretokih na modelu izmerjeni višji nivoji gladin kot v naravi (od 11 do 20 cm). Glede na to, da je model jezusa NEK izdelan v distorziranem merilu, lahko te razlike pripišemo tudi temu dejavniku.

Na modelu je bila nato dodana še hrapavost po poplavnih površinah, in sicer povsod, kjer je bilo iz ortofoto posnetka razvidno, da je področje poraščeno z drevesi ali grmičevjem. Večanje hrapavosti je

bilo izvedeno postopno z dodajanjem peska granulacije 4-8 mm. Na poplavnih površinah z večanjem hrapavosti ni prihajalo do velikih sprememb hidravličnih razmer na modelu, ker je desna poplavna površina, kjer nastopajo večji poplavni pretoki, precej manj poraščena kot leva poplavna površina, vendar so na slednji vsaj v dolvodnem delu pod brežiško teraso hitrosti vode zelo majhne in ima hrapavost na fizičnem modelu zelo majhen vpliv.” (Rodič in sod., 2010).

4.5 Rezultati raziskav

Poglavje o rezultatih raziskav je citirano iz poročila Rodiča in sod. (2010):

“Na umerjenem modelu so bile izvedene meritve nivojev gladin za pretoke 3000 m³/s, 4000 m³/s (dogodek 2. 11. 1990) in 5000 m³/s. Spodnji robni pogoj – nivo gladine v profilu P131, je bil določen na podlagi ekstrapolirane pretočne krivulje na merilnem mestu Budič v profilu P131. Grafični in tabelarni prikaz poteka gladin v strugi in na poplavnem področju je prikazan v **prilogah A.6 in A.7**.

Ker je pretok 4000 m³/s tudi dejansko nastopil 2. 11. 1990, je v grafični **prilogi A.7** razvidna tudi primerjava s takrat izmerjenimi nivoji gladine (na podlagi sledov vode) ob protipoplavnih nasipih. Ta primerjava kaže dobro ujemanje na začetku modela do NEK. Dolvodno od NEK so očitne precejšnje razlike med terenskimi meritvami in modelom (tudi do 1 m). Na podlagi zapisnika izvedbe meritev ni mogoče pojasniti, zakaj tolikšne razlike. Poleg možne napake pri meritvi bi lahko bila razlaga tudi ta, da so izmerjene višje kote posledica višjih kot dna v strugi od današnjih (tudi na modelu) in da so bili ob dogodku dolvodno od NEK zelo izraziti valovi, katerih konice so pustile višje kote sledov od dejanskega nivoja gladine. Takšne razlage bi lahko potrdila ali ovrgla šele raziskava ožjega območja NEK v manjšem nedistorziranem merilu.

Možna je tudi primerjava nivoja gladine v črpališču NEK, ko je bila ob takratnem dogodku izmerjena vrednost 154,87 m n.m. Na modelu je bila izmerjena kota nivoja gladine 154,82 m n.m., kar v tem primeru kaže na zelo dobro ujemanje.

4.5.1 Raziskave polnjenja retenzijskih prostorov, raziskava poti po retenzijskih površinah in toka z retenzijskih površin v strugo Save

Raziskava polnjenja retenzijskih prostorov, poti po poplavnih površinah in vračanja vode nazaj v strugo je bila opravljena pri pretokih 3000 m³/s, 4000 m³/s in 5000 m³/s. Z doziranjem barvila na več točkah in opazovanjem ter merjenjem potovanja in širine sledi barvila so bile določene poti toka po poplavnih površinah.

V grafičnih prilogah A.8, A.9 in A.10 so te poti prikazane in obarvane z značilno barvo:

- na desni strani struge so s svetlo modro barvo in vijolično barvo obarvane tiste poti vode, po katerih teče voda, ki prestopi desni breg struge, teče po desnem poplavnem področju in se izliva v reko Krko,
- na levi strani struge so z rdečo barvo obarvane tiste poti vode, po katerih teče voda, ki prestopi levi breg struge (od protipoplavnega nasipa dolvodno od NEK naprej), teče po levem poplavnem področju in se izliva nazaj v Savo med predvideno lokacijo HE Brežice in brežiško teraso,
- z modro barvo so označene poti vode, ki prestopi desni ali levi breg, teče v relativno ozkem pasu ob strugi (približno v bodočem akumulacijskem prostoru) in se še pred mestom bodoče HE Brežice ponovno vrača v strugo Save.

Poleg tega so bili izmerjeni pretoki vode po poplavnih površinah s pomočjo ločilnih zidov, s katerimi se je voda zajela in speljala do merilnih mest, kjer se je izmeril pretok na trikotnem merilnem jezu. Postavitev ločilnih zidov je bila sicer prilagojena vodnim potem pri 4000 m³/s, vendar je bilo mogoče pravilno izmeriti pretoke po poplavnih površinah tudi pri ostalih pretočnih situacijah.

Potek ločilnih zidov je razviden na **grafični prilogi A.1**. Označeni so z oznakami L1, L2, L3 in L4. Z ločilnim zidom L1 je bila zajeta voda, ki se preliva na desno poplavno področje nad NEK. Z ločilnim zidom L2 je bila zajeta voda, ki se preliva na desno poplavno področje gorvodno od profila P116. Z ločilnim zidom L3 je bila zajeta in izmerjena vsa voda, ki se preliva na desno poplavno področje in se izliva v Krko. Z ločilnim zidom L4 pa je bila zajeta in izmerjena voda, ki se preliva na levo poplavno področje med protipoplavnim nasipom dolvodno od NEK in gramoznico.

4.5.2 Raziskave toka vode po retenzijskih površinah za skupni pretok 3000 m³/s

Pri pretoku 3000 m³/s se voda na desne poplavne površine razliva preko celotne dolžine obravnavanega odseka in se vsa izliva v Krko.

Pretok po celotni desni poplavni površini je 633 m³/s, kar znaša 21,1 % skupnega pretoka. Pri tem znaša pretok na prvem odseku (od rečnega profila P108 do P116, dolžine 2,96 km) 181 m³/s oz. 6,0 % skupnega pretoka (136 m³/s nad NEK), na drugem odseku (od rečnega profila P116 do gorvodno od profila P126e, dolžine 4,95 km) 452 m³/s oz. 15,1 % skupnega pretoka.

Pretok vode, ki se preliva na levo poplavno površino od konca protipoplavnega zidu dolvodno od NEK ter do gramoznice v dolžini 3,49 km, znaša 352 m³/s oz. 11,7 % celotnega pretoka.

Skupni pretok vode po desni in levi poplavni površini znaša pri 3000 m³/s 985 m³/s oz. 32,8 % skupnega pretoka. Pretok vode po strugi znaša (v območju gramoznice pri Brežicah, ko se večinoma že vsa voda razlije na poplavne površine) 2015 m³/s oz. 67,2 %, pri čemer se ta voda na dolvodnem delu obravnavanega odseka delno razliva čez strugo, vendar le v ozkem pasu in se kmalu vrača nazaj v strugo.

Fotografije modela pri pretoku $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ so prikazane v **prilogi A.12**.

4.5.3 Raziskave toka vode po retenzijskih površinah za skupni pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$

Pri pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ sta na desni strani dva odseka, na katerih voda prestopa desni breg in teče po poplavnem področju vzdolž reke Save in se izliva v Krko.

Prvi odsek sega od rečnega profila P105, tj. od začetka modeliranega odseka reke Save, do rečnega profila P112 v dolžini 2,85 km. Skupni pretok na tem odseku znaša $850 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 21,3 % celotnega pretoka, od tega $749 \text{ m}^3/\text{s}$ nad NEK oz. 18,7 % celotnega pretoka.

Drugi odsek, na katerem se voda prelija čez desni breg, sega od rečnega profila P116 do rečnega profila P119a v dolžini 1,50 km. Pretok vode v tem delu znaša $245 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 6,1 % skupnega pretoka.

Skupni pretok na desni poplavni površini znaša $1095 \text{ m}^3/\text{s}$, kar pomeni 27,4 % skupnega pretoka.

Na levi poplavni površini se voda prelija čez levi breg struge praktično po celotni obravnavani dolžini in se vrača nazaj v strugo v ozkem pasu pod brežiško teraso. Na modelu je bil izmerjen skupni pretok vode, ki se prelija na poplavno površino od konca protipoplavnega zidu dolvodno od NEK ter do gramoznice v dolžini 3,49 km (ta del je bil omejen in zajet na merilno mesto s pomočjo ločilnega zidu L4). Pretok znaša $661 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 16,5 % celotnega pretoka.

Pri $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ znaša skupni pretok vode po desni in levi poplavni površini $1756 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 43,9 % skupnega pretoka. Pretok vode po strugi znaša (v območju gramoznice pri Brežicah, ko se praktično že vsa voda razlije na poplavne površine) $2244 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 56,1 %, pri čemer se ta voda delno tudi razliva čez strugo, vendar v relativno ozkem pasu in se kmalu vrača nazaj.

Fotografije modela pri pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ so prikazane v **prilogi A.13**.

4.5.4 Raziskave toka vode po retenzijskih površinah za skupni pretok $5000 \text{ m}^3/\text{s}$

Pri skupnem pretoku $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ se po širši desni poplavni površini razliva samo tista voda, ki prestopi desni breg na odseku od rečnega profila P105 do P111 v dolžini 2,36 km. Ta voda potuje vzdolž retenzijskega prostora vzporedno s strugo Save in se izliva v Krko, delno pa tudi med profiloma P125 in P126 nazaj v Savo. Pretok te vode znaša $1537 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 30,7 % celotnega pretoka, na modelu pa je bil določen tudi prej omenjeni del tega pretoka, ki se izliva v Savo, in sicer $173 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pretok vode, ki se prelija na levo poplavno površino od konca protipoplavnega zidu dolvodno od NEK ter do gramoznice v dolžini 3,49 km, znaša $999 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 20,0 % celotnega pretoka. Tudi ta voda se vrača v Savo v ozkem pasu pod brežiško teraso.

Skupni pretok vode po desni in levi poplavni površini znaša pri 5000 m³/s 2603 m³/s oz. 52,1 % skupnega pretoka. Pretok vode po strugi znaša 2397 m³/s oz. 47,9 %, pri čemer se ta voda na celotnem obravnavanem odseku delno razliva čez strugo, vendar spet v ozkem pasu in se kmalu vrača nazaj.

Fotografije modela pri pretoku 5000 m³/s so prikazane v **prilogi A.14.**~ (konec citata).

4.5.5 Ugotovitve pri raziskavi toka vode po poplavnih področjih

V tabeli v **prilogi A.11** so na enem mestu prikazani vsi pretoki po desnem in levem poplavnem področju in po strugi ter razmerja glede na skupni pretok.

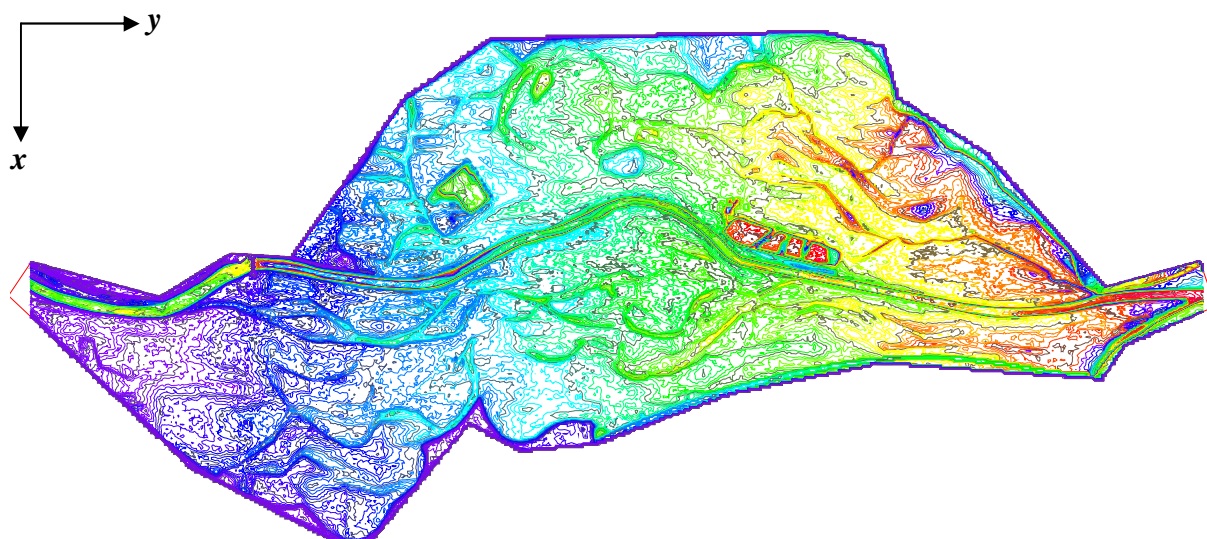
Iz grafičnih prilog in tabelarične priloge je razvidno, da se večina vode, ki prestopi breg struge, vrača nazaj v strugo šele dolvodno od predvidene HE Brežice, na desni strani v Krko in na levi strani nazaj v Savo pod brežiško teraso. Medsebojna izmenjava vode med strugo in poplavnimi področji pa je relativno šibka (najmanj pri 3000 m³/s in največ pri 5000 m³/s).

Očitno je tudi, da je razporeditev poplavnih poti vode na desni strani mnogo bolj odvisna od skupnega pretoka kot na levi strani, kjer ostajajo poplavne poti praktično enake za vse pretoke. Na tej strani so namreč ob večjem poplavnem prostoru za malo manj kot polovico manjši pretoki kot na desni strani, kjer so nasprotno večji pretoki vode po ožjem poplavnem področju, kjer se tok vode razporeja glede na velikost pretoka.

5 MATEMATIČNI MODEL BREŽICE

5.1 Opis modela in računski detajli

Z matematičnim modelom PCFLOW2D smo simulirali tokovne razmere na fizičnem modelu Brežice, ki so podrobneje opisane v poglavju 4. Po izgradnji fizičnega modela je bil opravljen natančen laserski posnetek modela, ki je bil primerjan z LIDAR posnetkom terena. Iz podatkov o dejanski topografiji fizičnega modela smo izdelali batimetrijo obravnavanega območja, na osnovi katere smo določili kote dna računskih celic matematičnega modela. Območje jezu NEK je bilo potrebno natančneje opisati, zato smo računskim celicam na tem območju pripisali točne vrednosti iz načrtov in ne iz laserskega posnetka fizičnega modela. Plastnice tako pripravljene obravnavanega območja so prikazane na sliki 5.1 in podrobneje v **prilogi B.1**.



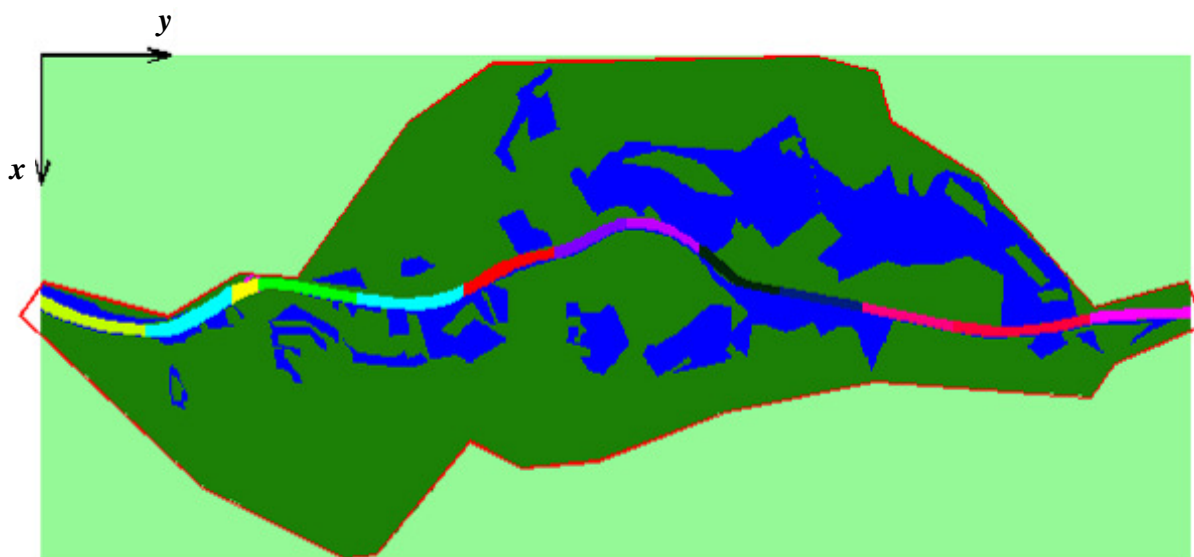
Slika 5.1: Plastnice obravnavanega območja HE Brežice, uporabljene v matematičnem modelu.

Figure 5.1: Bathymetry of the HPP Brežice area used in the mathematical model.

Matematični model obsega celotno območje fizičnega modela in meri v x smeri (približno pravokotno na smer toka) 4458 m, v y smeri (približno vzporedno s smerjo toka) pa 10138 m. Osnovna mreža točk numeričnega modela je sestavljena iz celic velikosti 20 x 20 m, ki pa je v x smeri zgoščena na območju struge (do minimalno 3 m) in v y smeri na območju jezu NEK (do minimalno 6 m). Tako znaša najmanjša velikost celice v okolici pregrade NEK 3 x 6 m. Takšne dimenzije zgoščene numerične mreže so bile izbrane z namenom, da se natančneje zajame dejansko geometrijo prelivnih polj in ločilnih stebrov jezu NEK (stebri so široki 3,0 m in dolgi 18,8 m; prelivno polje je široko 15,0 m). Število celic v x smeri je 531, v y smeri pa 533, kar pomeni, da ima matematični model 283023 računskih točk. Le-te so ločene na točke struge (18388), točke na poplavnem področju (117900) in točke, ki pokrivajo območje izven fizičnega modela (96566). Točke struge so bile dodatno ločene na 13 podobmočij vzdolž struge tako, da je bilo v fazi umerjanja možno lokalno spreminjanje vrednosti

Manningovih koeficientov hrapavosti. Na podoben način so bile dodatno ločene točke na poplavnih področjih, ki predstavljajo območja s povečano zarastjo in jim je bila hrapavost dodatno povečana na fizičnem modelu.

Na območju pregrade NEK smo izločili računske točke, ki predstavljajo ločilne stebre med prelivnimi polji, prav tako pa tudi točke na ostri vertikalni meji med objektom NEK in strugo. Te točke bi sicer lahko povzročale določeno napako oz. nestabilnost pri računih, saj bi nastala prevelika višinska razlika med sosednjimi celicami. Računsko območje matematičnega modela s prikazom razdelitve računskih točk po območjih je prikazano na sliki 5.2.



Slika 5.2: Razdelitev računskega območja modela HE Brežice na skupine računskih točk z različnimi atributi.

Figure 5.2: Distribution of the computational domain of the HPP Brežice model on numerical point groups with different attributes.

5.2 Začetni in robni pogoji

Vsi izvedeni računi so simulirali stalni tok, kakršen je bil tudi na fizičnem modelu. Ker pa je matematični model PCFLOW2D zasnovan kot model za nestalni tok, smo za zgornji robni pogoj podali kvazi hidrogram, ki je predstavljal stalni tok in je bil v vseh primerih oblike:

Čas [h]	Pretok [m ³ /s]
0	400
0,25	polni pretok
24	polni pretok

Spodnji robni pogoj je bil podan v predzadnji, 532. vrstici v obliki $Q(h)$ krivulje. Krivulja je bila enaka tisti, uporabljeni na fizičnem modelu. Časovni korak je bil nastavljen na $\Delta t = 2$ s, kar je zagotavljalo stabilnost izračuna. Za primere manjših dveh pretokov, ko vsa voda teče po strugi, je bil čas trajanja

simulacije t_{max} nastavljen na 18000 s (5 h). Za večje pretoke je bilo potrebno simulacije podaljšati do $t_{max} = 36000$ s (10 h). Po takšnem času je bil namreč na modelu vzpostavljen stalni tok in ni bilo več razlik v rezultatih pri podaljševanju časa simulacij.

Vsi izračuni so bili opravljeni na boljših osebnih računalnikih (procesor Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1650 0 @ 3,20 GHz), tipičen čas 10-urne simulacije pa je znašal ca. 14 dni. Z uporabo novejšega in učinkovitejšega prevajalnika programske kode PGI Workstation 13.4 se je čas simulacij praktično prepolovil. Omenjeni prevajalnik namreč programsko kodo prevede v obliko, primerno tudi za 64-bitne procesorje. Izboljšan prevajalnik je v svojem delu sicer uporabil že Hamzić (2012). V našem delu smo z dodatnimi optimizacijskimi nastavitvami, ki jih dopušča prevajalnik, računski čas še dodatno optimizirali in dosegli še ca. 35 % hitrejši izračune.

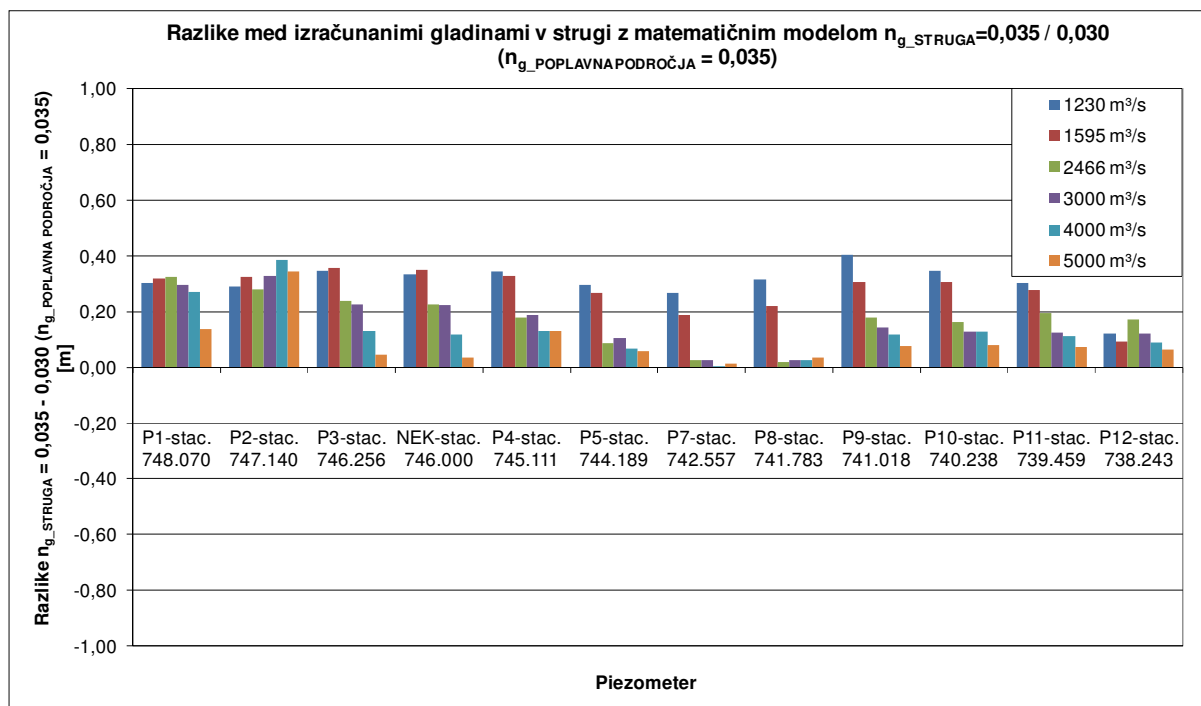
5.3 Umerjanje modela

Umerjanje matematičnega modela je bilo izvedeno na osnovi podatkov, dobljenih iz meritev na fizičnem modelu. Kot je opisano v poglavju 4, so bile za pretoke 1230, 1595, 2466, 3000, 4000 in 5000 m³/s na fizičnem modelu izmerjene gladine vzdolž struge in v več točkah na poplavnih področjih. Umerjanje matematičnega modela je bilo izvedeno ob spreminjanju Manningovega koeficienta hrapavosti (odsekoma oz. po območjih) ob konstantni vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010$ m²/s. Takšna izhodiščna vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti je bila izbrana na podlagi izkušenj z modeliranjem podobnih tokov, detajlnejša analiza omenjenega koeficienta sledi v nadaljevanju poglavja. Tako določene vrednosti n_g so bile kasneje upoštevane tudi pri drugih dveh v nalogi uporabljenih modelih turbulence.

5.3.1 Občutljivostna analiza modela na vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti n_g

V prvi fazi smo opravili podrobno občutljivostno analizo matematičnega modela na spreminjanje vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti n_g po posameznih območjih (v strugi, na poplavnih področjih in na poplavnih področjih s povečano hrapavostjo). S tem je bilo pripravljeno orodje, s katerim je bilo moč relativno hitro izvesti umerjanje modela.

V prvem koraku smo za celotno območje matematičnega modela privzeli vrednost Manningovega koeficienta $n_g = 0,035$ sm^{-1/3}. Izvršili smo izračune za vseh 6 obravnavanih pretokov in ovrednotili rezultate. Ker je bila uporabljena precej visoka vrednost za koeficient n_g , so bile izračunane gladine na določenih mestih precej višje od izmerjenih na fizičnem modelu. Zato smo v drugi fazi izvršili izračune za vseh 6 pretokov ob nižjih vrednostih Manningovega koeficienta na območju struge $n_{g_STRUGA} = 0,030$ sm^{-1/3}. Vrednosti n_g na poplavnih področjih so ostale enake in sicer $n_{g_POPLAVNA}$ $n_{g_PODROČJA} = 0,035$ sm^{-1/3}. Na spodnjem grafu (slika 5.3) so prikazane tako določene razlike gladin v opazovanih točkah vzdolž struge.

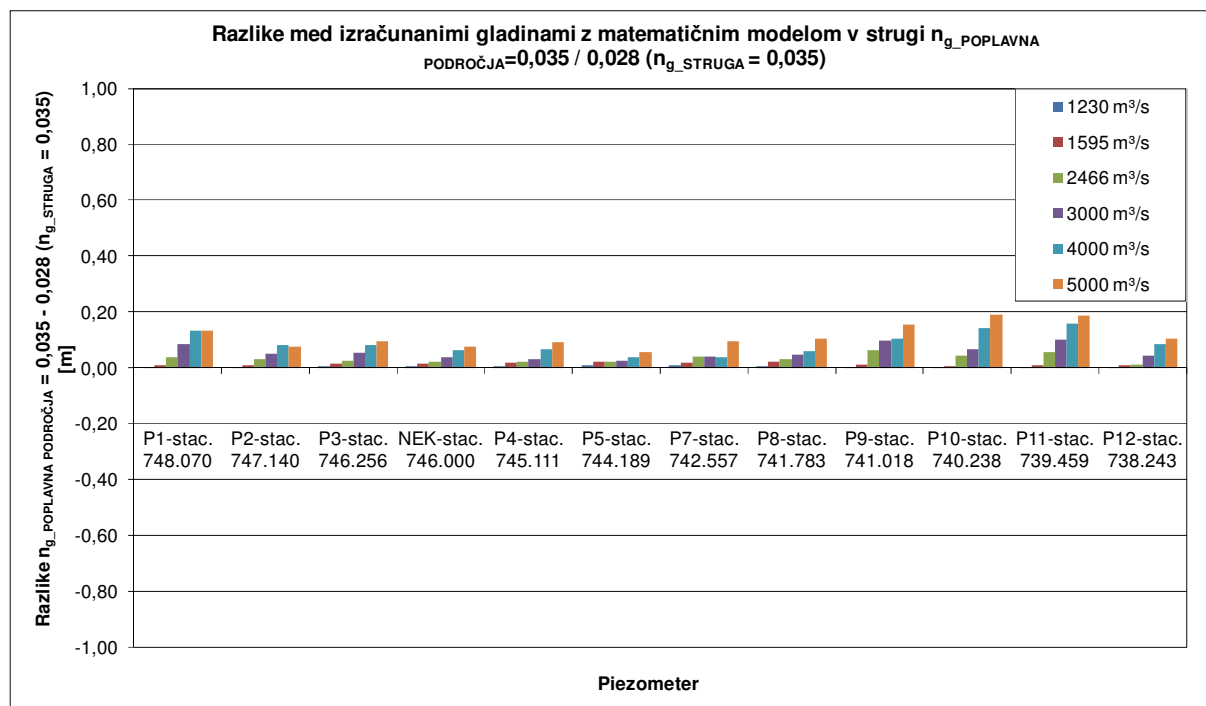


Slika 5.3: Prikaz razlik v gladini vode pri spremembi vrednosti Manningovega koeficienta n_g v strugi iz $0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ na $0,030 \text{ sm}^{-1/3}$.

Figure 5.3: Display of differences between water levels after changing the value of the Manning coefficient n_g in the main channel from $0.035 \text{ sm}^{-1/3}$ to $0.030 \text{ sm}^{-1/3}$.

Iz slike 5.3 lahko vidimo, da ima spreminjanje vrednosti Manningovega koeficienta v strugi tem večji vpliv, čim manjši je skupni pretok. To je seveda pričakovan rezultat, saj pri večjih pretokih velike količine vode tečejo po poplavnih področjih, kjer pa je pri zgornji analizi vrednost n_g ostala enaka. Na podlagi pridobljenih podatkov iz pričujoče analize vpliva spremembe vrednosti n_g v strugi smo v procesu dokončnega umerjanja matematičnega modela lahko precej natančno ocenili, kakšna gladinska stanja bomo dobili ob spremembi vrednosti n_g na določenem odseku v strugi pri različnih pretokih. Zato je bilo umerjanje modela izvedeno precej hitreje, še prej pa smo opravili podobne analize občutljivosti za poplavna področja.

Na fizičnem modelu, ki nam je služil kot referenca za umerjanje matematičnega modela, so bila poplavna področja relativno gladka (beton). Hrapavost smo dodatno povečali le na območjih, kjer je bila iz ortofoto posnetka razvidna večja poraščenost terena z drevesi ali grmičevjem. V tretji fazi občutljivostne analize smo tako vsem poplavnim površinam pripisali nižjo vrednost koeficienta $n_{g_POPLAVNA PODROČJA} = 0,028 \text{ sm}^{-1/3}$, ob konstantni vrednosti $n_{g_STRUGA} = 0,035 \text{ sm}^{-1/3}$. Razlike v nivojih izračunanih gladin vzdolž struge zaradi spremembe vrednosti $n_{g_POPLAVNA PODROČJA}$ so prikazane na spodnjem grafikonu (slika 5.4).

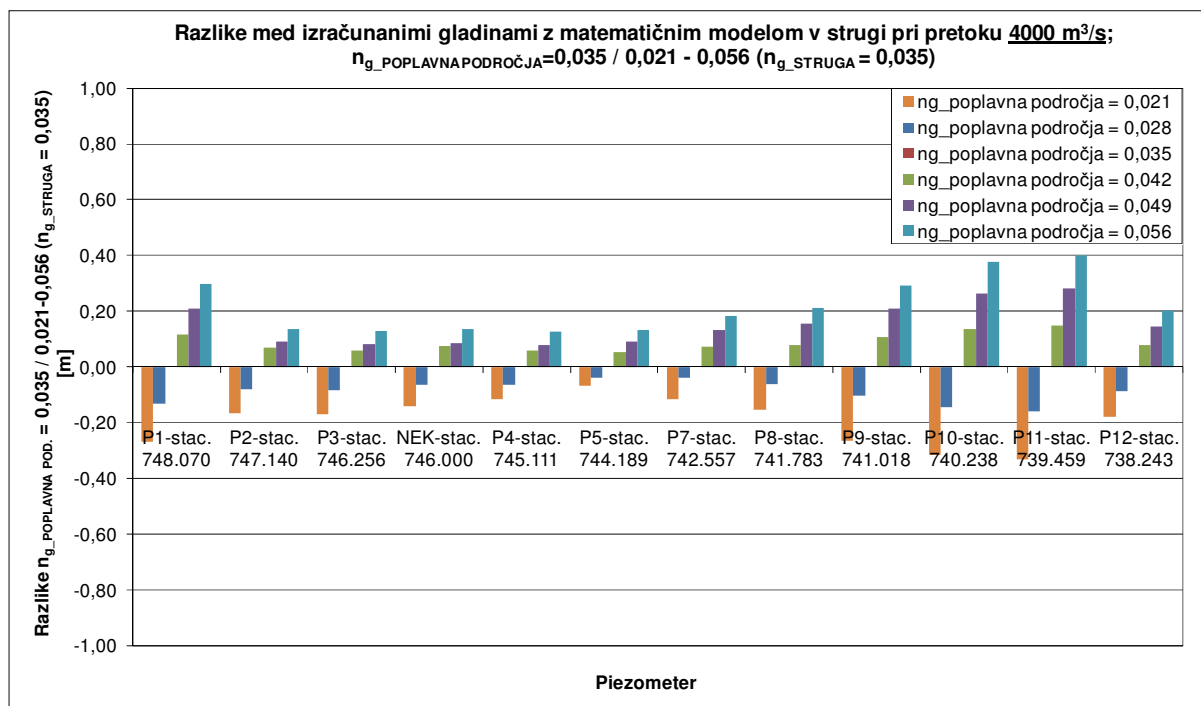


Slika 5.4: Prikaz razlik v gladini vode pri spremembi vrednosti Manningovega koeficienta n_g na poplavnih področjih iz $0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ na $0,028 \text{ sm}^{-1/3}$.

Figure 5.4: Display of differences between water levels after changing the value of the Manning coefficient n_g on the flood plains from $0.035 \text{ sm}^{-1/3}$ to $0.028 \text{ sm}^{-1/3}$.

Z večanjem skupnega pretoka se večja tudi vpliv koeficienta hrapavosti na poplavnih površinah, saj je pri večjem pretoku večji del poplavnih površin poplavljen. Poleg tega se pri večjih pretokih po poplavnih površinah pojavijo večje hitrosti, kar seveda tudi pripomore k večjemu vplivu koeficienta hrapavosti, saj je trenjski člen odvisen od kvadrata hitrosti toka. Sprememba n_g na poplavnih področjih za $0,007 \text{ sm}^{-1/3}$ pomeni do največ 19 cm vpliva na gladine v strugi, pa še to le za največji obravnavani pretok $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. Pri manjših pretokih je ta vpliv manjši. Iz slike 5.4 je vidno, da je vpliv spremembe vrednosti koeficienta $n_{g_POPLAVNA \text{ PODROČJA}}$ večji na dolvodnem koncu obravnavanega območja, najmanjši pa v srednjem delu. Tok vode po poplavnih področjih je v srednjem delu obravnavanega območja namreč ločen (odmaknjen) od glavne struge in zaradi tega na tem območju ne prihaja do izmenjave vode med glavno strugo in poplavnimi področji. Prav nasprotno pa na dolvodnem koncu obravnavanega območja prihaja do intenzivne izmenjave vode med poplavnimi površinami in glavno strugo, še posebej med levo retenzijo in strugo, saj se tam vodni tok z retenzije vrača ob brežiški terasi v strugo Save. Obravnavano območje skupaj s tokovno sliko pri pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ je prikazano v prilogi B.5.

Za izbrani pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ smo opravili poglobljeno analizo vpliva vrednosti koeficienta hrapavosti n_g na poplavnih področjih. Izvršili smo serijo izračunov, za katere je bila vrednost $n_{g_STRUGA} = 0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ konstantna, vrednosti koeficienta $n_{g_POPLAVNA \text{ PODROČJA}}$ pa so bile od $0,021 \text{ sm}^{-1/3}$ do $0,056 \text{ sm}^{-1/3}$. Na sliki 5.5 je prikazan vpliv vrednosti koeficienta $n_{g_POPLAVNA \text{ PODROČJA}}$ na potek gladin v strugi vzdolž matematičnega modela.

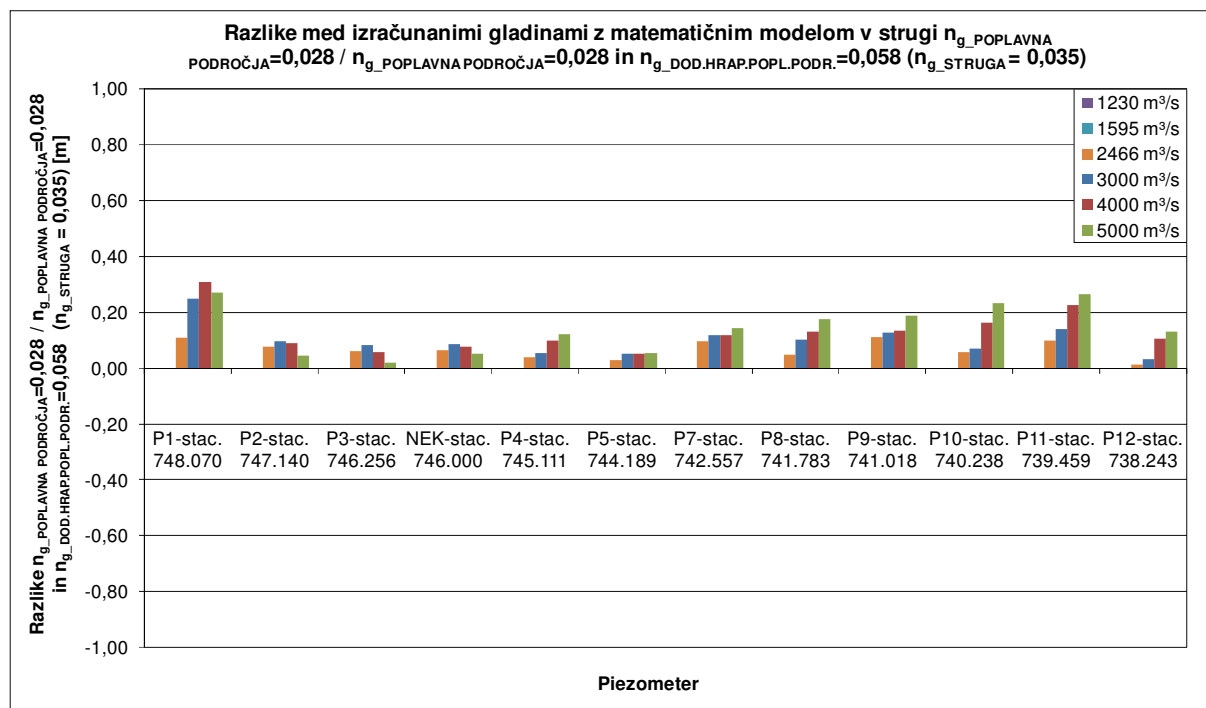


Slika 5.5: Vpliv vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti na poplavnih področjih na potek gladin v strugi vzdolž matematičnega modela pri pretoku $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 5.5: Impact of Manning roughness coefficient on the flood plains on water levels in the main channel along the mathematical model for the discharge of $4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Kot je bilo že opisano, ima koeficient hrapavosti na poplavnih področjih največji vpliv na dolvodnem koncu obravnavanega območja, kjer je izmenjava med tokom vode po strugi in po poplavnih področjih največja. Poleg tega so na tem območju hitrosti na poplavnih področjih največje. V opazovani točki v strugi P11 (stacionaža 739.459) je razlika med koto vode pri $n_{g_POPLAVNA\text{ PODROČJA}} = 0,021 \text{ sm}^{-1/3}$ in koto pri $n_{g_POPLAVNA\text{ PODROČJA}} = 0,056 \text{ sm}^{-1/3}$ največja in znaša $\Delta h = 0,73 \text{ m}$.

Kot je opisano v opisu fizičnega modela v poglavju 4, je bila na določenih delih poplavnega področja hrapavost dodatno povečana. Vpliv dodatne hrapavosti smo preverili tudi z matematičnim modelom. Ob konstantni vrednosti $n_{g_STRUGA} = 0,035 \text{ sm}^{-1/3}$ in $n_{g_POPLAVNA\text{ PODROČJA}} = 0,028 \text{ sm}^{-1/3}$ smo poplavnim področjem z večjo hrapavostjo (na fizičnem modelu) pripisali večjo vrednost $n_{g_DOD.HRAP.POPL.PODR.} = 0,058 \text{ sm}^{-1/3}$. Ovrednoten vpliv je prikazan na sliki 5.6.



Slika 5.6: Prikaz razlik v gladini vode pri spremembi vrednosti Manningovega koeficienta n_g na poplavnih področjih s povečano hrapavostjo iz $0,028 \text{ sm}^{-1/3}$ na $0,058 \text{ sm}^{-1/3}$.

Figure 5.6: Display of differences between water levels after changing of value of the Manning coefficient n_g on the additionally roughened flood plains from $0.028 \text{ sm}^{-1/3}$ to $0.058 \text{ sm}^{-1/3}$.

Relativno velika sprememba vrednosti Manningovega koeficienta na zaraščenih poplavnih področjih nima velikega vpliva na potek gladin vzdolž struge Save. Še največji vpliv se je pokazal na skrajno gorvodnem delu obravnavanega območja, kjer so praktično vsa poplavna področja zaraščena. Prikaz poplavnih področij s povečano hrapavostjo je podan na sliki 5.7 in podrobneje v **prilogi B.6**.

5.3.2 Rezultati umerjanja

Umerjanje matematičnega modela je bilo po predhodno opravljeni analizi vpliva Manningovega koeficienta hrapavosti moč izvesti relativno hitro. V prvi fazi smo umerili strugo za manjše tri pretoke (1230 , 1595 , $2466 \text{ m}^3/\text{s}$), ko še ne pride do razlivanja vode na retenzijske površine (razen v manjši meri pri pretoku $2466 \text{ m}^3/\text{s}$). Manningov koeficient smo odsekoma spreminjali toliko časa, da smo dobili kar najmanjše razlike med meritvami na fizičnem modelu in rezultati matematičnega modela. Potrebno je poudariti, da imajo vse izmerjene vrednosti, tako na terenu (ti podatki so bili uporabljeni za umerjanje fizičnega modela), kot tudi vrednosti, izmerjene na fizičnem modelu, določeno stopnjo negotovosti. Pri interpretaciji rezultatov umerjanja je le-to potrebno upoštevati. Na podlagi izkušenj smo si postavili realne omejitve za vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti v strugi: $0,025 < n_g < 0,040$. Poleg tega ni bil namen z matematičnim modelom natančno reproducirati stanja, izmerjenega na fizičnem modelu, temveč na konkretnem primeru jasno razmejiti vpliv posameznih parametrov v matematičnem modelu (koeficienta hrapavosti n_g in koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t) na rezultate.

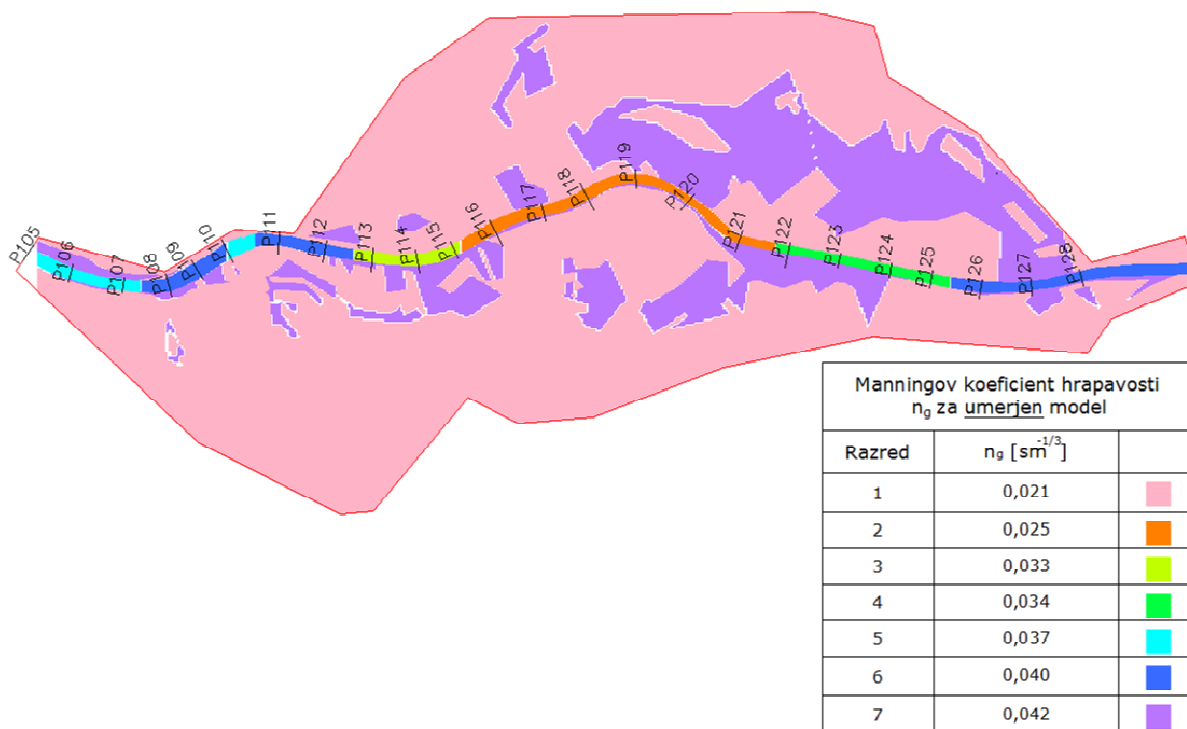
V naslednji fazi smo umerili koeficiente hrapavosti na poplavnih površinah hkrati z manjšimi korekcijami n_g v strugi. Za ta namen smo uporabili podatke o izmerjenih gladinah na fizičnem modelu pri pretokih 3000, 4000 in 5000 m³/s. Poplavnim površinam, ki so bile na fizičnem modelu sorazmerno gladke (beton), smo pripisali drugačno vrednost n_g kot tistim, ki jim je bila na fizičnem modelu hrapavost dodatno povečana. Pri umerjanju so nam zelo prav prišle ugotovitve iz občutljivostne analize vpliva vrednosti Manningovih koeficientov hrapavosti (poglavje 5.3.1). V preglednici 5.1 so podane končne vrednosti n_g za umerjen matematični model Brežice. Prostorska porazdelitev vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti n_g je prikazana na sliki 5.7.

Preglednica 5.1: Vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti n_g za umerjen matematični model Brežice.

Table 5.1: Manning roughness coefficient values for the calibrated mathematical model Brežice.

Odsek	Od stacionaže Save [m]	Do stacionaže Save [m]	n_g [sm ^{-1/3}]
Struga 1	748.070	747.140	0,037
Struga 2	747.140	746.256	0,040
Struga 3	746.256	746.000	0,037
Struga 4	746.000	745.111	0,040
Struga 5	745.111	744.189	0,033
Struga 6	744.189	743.256	0,025
Struga 7	743.256	742.557	0,025
Struga 8	742.557	741.783	0,025
Struga 9	741.783	741.018	0,025
Struga 10	741.018	740.238	0,034
Struga 11	740.238	739.459	0,034
Struga 12	739.459	738.243	0,040
Struga 13	738.243	737.308	0,040
Gladka poplavna področja			0,021
Poplavna področja s povečano hrapavostjo			0,042

Nekateri avtorji, npr. Wu, Shen in Chou (1999), Strupczewski in Szymkiewicz (1996), ugotavljajo, da vrednost koeficienta n_g v obravnavanem profilu ni konstantna, ampak je odvisna od vodostaja. Praviloma naj bi bil pri višjih vodostajih koeficient hrapavosti manjši, saj je takrat relativni vpliv ovir na tok vode manjši. V našem primeru smo vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti n_g določili kot konstantne, ki veljajo za vse pretoke. S spreminjanjem koeficienta n_g s pretokom bi seveda lahko dobili še boljše ujemanje med meritvami na fizičnem modelu in izračunanimi vrednostmi, vendar je potrebno biti pri tem zelo pazljiv. Navadno z umerjenim matematičnim modelom modeliramo stanja pri večjih pretokih, pri tem pa nastopi problem ekstrapolacije vrednosti koeficientov hrapavosti, kar lahko povzroči večje napake v rezultatih.

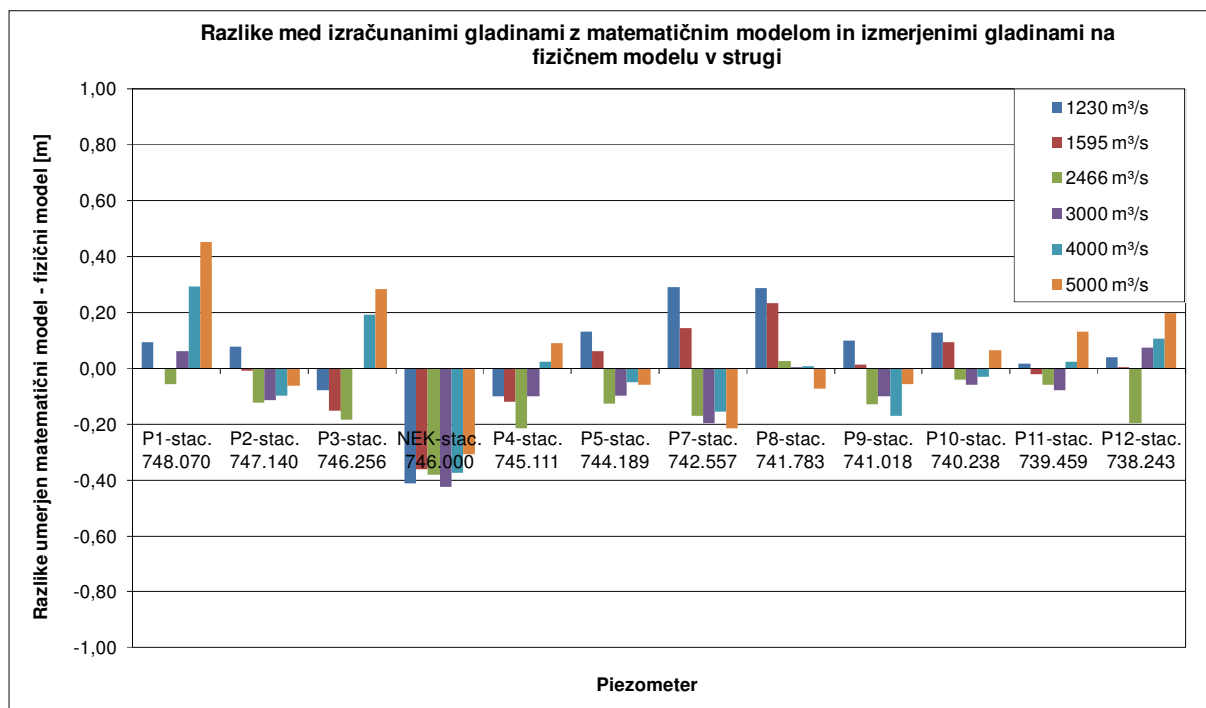


Slika 5.7: Prostorska porazdelitev vrednosti Manningovega koeficienta hrapavosti n_g za umerjen matematični model Brežice.

Figure 5.7: Spatial distribution of the Manning roughness coefficient values for the calibrated mathematical model Brežice.

Na podlagi rezultatov tako umerjenega matematičnega modela je v **prilogi B.2** prikazan vzdolžni potek gladin po strugi Save za simuliranih 6 pretokov. Na istem diagramu so prikazane tudi izmerjene gladine na fizičnem modelu. Tabelarične vrednosti izračunanih gladin v posameznih točkah v strugi so prikazane v **prilogi B.3**. Te točke so izbrane na mestih, kjer so potekale meritve gladin tudi na fizičnem modelu, tako da je mogoča primerjava med rezultati obeh modelov, ki je v tabelarični obliki prav tako prikazana v **prilogi B.3**.

Ujemanje matematičnega in fizičnega modela je v glavnem zelo dobro, do večjih razlik (maksimalno odstopanje meritev od izračunanih vrednosti znaša v naravi 45 cm) prihaja pri največjih dveh pretokih v najvišje ležeči opazovani točki. Ta točka se nahaja na samem gorvodnem robu matematičnega modela (2. vrstica), kjer še lahko prihaja do določene napake zaradi začetnega širjenja vode iz struge na poplavna področja. Nekoliko večje razhajanje med izračunanimi in izmerjenimi gladinami je tudi na mestu črpališča NEK (31 – 42 cm). Na fizičnem modelu so bile namreč izmerjene višje gladine, ki pa so dejansko previsoke glede na meritve v naravi. Kot je opisano že v poglavju 4.4, lahko to pripišemo vplivu distorzije objekta jezu NEK. Zaradi obeh omenjenih razlogov ter omejitev, ki smo si jih na podlagi izkušenj postavili sami, nismo na območju jezu uporabili višjih vrednosti Manningovega koeficienta n_g , kar bi prineslo boljše ujemanje obeh modelov. V ostalih točkah je ujemanje boljše, saj so skoraj vse razlike v intervalu ± 20 cm. Na sliki 5.8 so prikazane razlike med izmerjenimi gladinami v strugi Save na fizičnem modelu in izračunanimi vrednostmi z matematičnim modelom.



Slika 5.8: Prikaz razlik med izračunanimi gladinami z matematičnim modelom PCFLOW2D in izmerjenimi gladinami na fizičnem modelu.

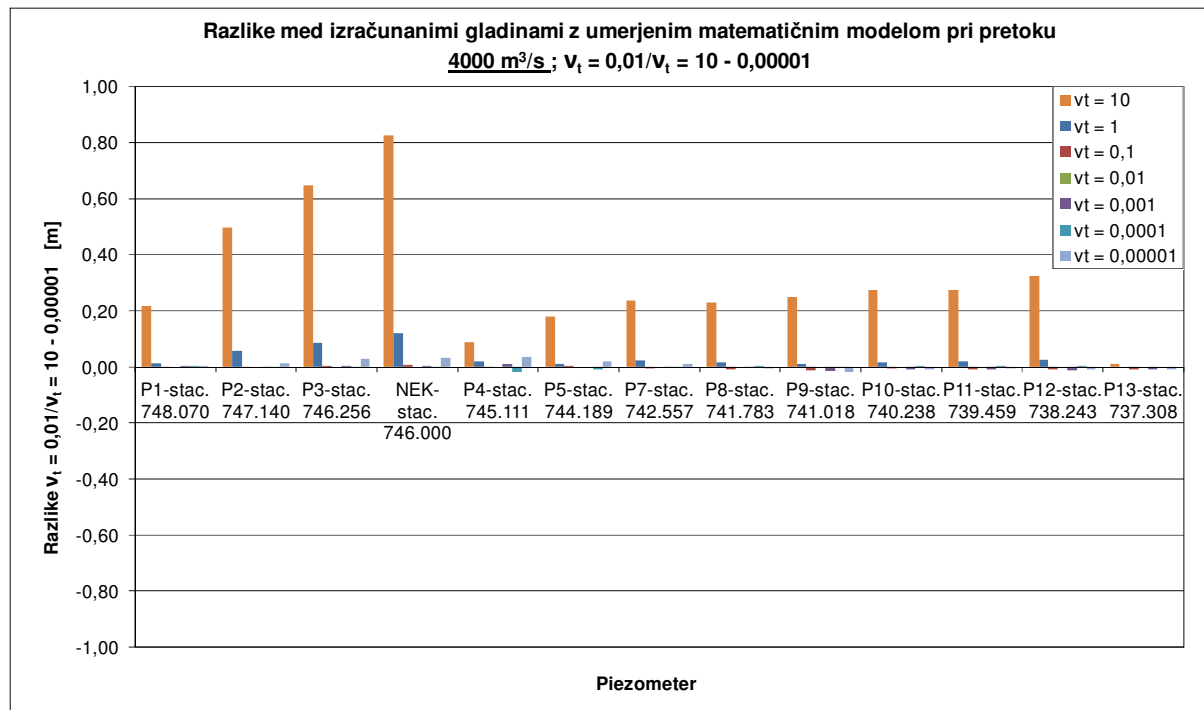
Figure 5.8: Display of differences between the calculated water levels with the mathematical model PCFLOW2D and the measured water levels on the physical model.

Za posamezne večje pretoke (nad $3000 \text{ m}^3/\text{s}$), za katere so bili na voljo podatki s fizičnega modela, je bila opravljena detajlnejša primerjava izračunanih in izmerjenih gladin na poplavnih površinah. Tako kot v strugi je tudi na poplavnih področjih ujemanje med rezultati obeh modelov dobro. Sicer prihaja do posameznih manjših odstopanj, ko je na primer določena opazovana celica na poplavnem področju v matematičnem modelu ostala suha, na istem mestu na fizičnem modelu pa imamo zabeleženo koto vode (in obratno), vendar gre v glavnem za primere ob robu poplavljenega območja, kjer so globine vode izredno majhne in že majhno lokalno odstopanje v koti terena privede do omočene oz. suhe točke. Detajlnejša primerjava izračunanih in izmerjenih gladin na poplavnih površinah je za pretoke $3000, 4000$ in $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ prikazana v tabelarični obliki v **prilogi B.4**.

5.3.3 Občutljivostna analiza vrednosti kinematičnega koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t

Za umerjen matematični model smo izdelali občutljivostno analizo vpliva vrednosti kinematičnega koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t . Umerjanje matematičnega modela smo namreč izvedli ob konstantni vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$ in spreminjanju Manningovega koeficienta hrapavosti po območjih. Vrednost $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$ predstavlja po naših dosedanjih izkušnjah neko relativno dobro in primerno vrednost za tip toka reke Save v območju HE Brežice, ki je obravnavan v tej nalogi.

Analiza je bila opravljena za 10x, 100x in 1000x večje in manjše vrednosti koeficienta ν_t pri pretoku 4000 m³/s, ko je velik del poplavnih področij že poplavljen. Na sliki 5.9 so prikazane razlike v gladinah vzdolž struge glede na rezultate za referenčno vrednost koeficienta $\nu_t = 0,010$ m²/s.



Slika 5.9: Vpliv vrednosti koeficienta kinematične turbulentne viskoznosti ν_t na potek gladin v strugi vzdolž umerjenega matematičnega modela pri pretoku 4000 m³/s.

Figure 5.9: Impact of kinematic turbulent viscosity coefficient ν_t on water levels in the main channel along the calibrated mathematical model for the discharge of 4000 m³/s.

Vidimo lahko, da je matematični model PCFLOW2D obravnavanega področja precej neobčutljiv na vrednost koeficienta kinematične viskoznosti. Šele pri 1000-krat večji vrednosti koeficienta ν_t od izbrane se pojavi opaznejši dvig gladin vzdolž matematičnega modela.

5.4 Rezultati modela in primerjava z meritvami na fizičnem modelu

5.4.1 Primerjava rezultatov različnih modelov turbulence

Iz izsledkov analize vpliva kinematičnega koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t na rezultate matematičnega modela je moč sklepati, da je vpliv turbulence v obravnavanem primeru majhen. Nekateri avtorji (Rodi, 1993) ugotavljajo, da se lahko v primerih obravnave večjih vodnih mas člene v dinamični enačbi, ki opisujejo vpliv turbulence, enostavno zanemari. Ti členi pa so izredno pomembni, kadar računamo širjenje določene snovi v toku in jih zato v takšnih primerih moramo upoštevati.

Za vseh šest v tej nalogi obravnavanih pretokov smo primerjali vzdolžni potek gladin, izračunan z vsemi tremi vgrajenimi modeli turbulence. Razlike med izračunanimi gladinami z različnimi modeli

turbulence so bile manjše od 1 cm, kar pomeni, da izbira modela turbulence pri obravnavi takšnega primera toka ne vpliva na izračunana gladinska stanja.

Zanimalo nas je, kakšne vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t dobimo ob uporabi $k - \varepsilon$ modela turbulence ter modela Smagorinsky. Za pretok $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ znaša izračunana povprečna vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti s $k - \varepsilon$ modelom turbulence $\bar{\nu}_t = 0,044 \text{ m}^2/\text{s}$. Model Smagorinsky daje nekoliko manjšo povprečno vrednost $\bar{\nu}_t = 0,024 \text{ m}^2/\text{s}$. Primerjava z obema modeloma turbulence izračunanih povprečnih vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti in izhodiščne konstantne vrednosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$, ki je bila uporabljena pri izračunih z modelom s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti, pove, da smo velikostni red koeficienta pravilno ocenili. Prostorska razporeditev koeficienta ν_t za vse tri uporabljene modele turbulence je prikazana v **prilogah B.7 do B.9**. Kot je opisano že v poglavju 5.3.3, prostorska porazdelitev koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t v obravnavanem primeru ni pomembna, pravilno je potrebno oceniti zgolj velikostni red vrednosti ν_t , ki pa je pri vseh treh uporabljenih modelih turbulence enak. Iz tega razloga tudi nismo natančno umerjali modela Smagorinsky, kar je sicer potrebno storiti v primeru, ko pravilno modeliranje turbulence bistveno vpliva na lastnosti toka. Podrobnejša analiza modela turbulence Smagorinsky bo predstavljena v nadaljevanju dela, na primeru toka v ribji stezi (poglavje 7). Za potrebe simulacij območja HE Brežice smo uporabili kar navadno priporočena vrednost koeficienta Smagorinsky $C_s = 0,17$ (Rogallo in Moin, 1984; Mellor, 2004).

5.4.2 Vpliv posameznih členov v dinamični enačbi

Iz rezultatov matematičnega modela je razvidno, da so gladinska stanja ob enakih robnih pogojih pri vseh treh modelih turbulence zelo podobna. To si lahko razložimo s tem, da vpliv členov v dinamični enačbi, ki opisujeta vpliv turbulence, ni velik. Za potrditev te teze smo opravili podrobno analizo vpliva posameznih členov dinamičnih enačb v obeh smereh, kar je predstavljeno v nadaljevanju poglavja.

Za diskretizacijo posameznih členov je potrebno dinamični enačbi v x (enačba 2.33) in y (enačba 2.34) smeri integrirati znotraj kontrolnega volumna. Kontrolni volumen je prikazan na sliki 5.10:

Za lažje nadaljnje delo smo posamezne člene označili od 0 do 7.

Diskretizacija 0. člena:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} = \frac{((H_{i,j}u_{i,j})_{t1} - (H_{i,j}u_{i,j})_{t2})}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Diskretizacija 1. člena:

$$\frac{\partial(hu^2)}{\partial x} = \frac{H^{**}u_{i+1,j}^2 - H^*u_{i,j}^2}{\Delta x_{i,j}/2 + \Delta x_{i-1,j}/2} \quad (5.3)$$

pri čemer velja:

$$H^* = \frac{H_{i-1,j} + H_{i,j}}{2} \quad (5.4)$$

$$H^{**} = \frac{H_{i,j} + H_{i+1,j}}{2} \quad (5.5)$$

Diskretizacija 2. člena:

$$\frac{\partial(huv)}{\partial y} = \frac{H^{**}u^{**}v_{i,j+1} - H^*u^*v_{i,j}}{\Delta y_{i,j}/2 + \Delta y_{i,j-1}/2} \quad (5.6)$$

pri čemer velja:

$$H^* = \frac{H_{i,j-1} + H_{i,j}}{2} \quad (5.7)$$

$$H^{**} = \frac{H_{i,j} + H_{i,j+1}}{2} \quad (5.8)$$

$$u^* = \frac{u_{i,j}\Delta x_{i,j} + u_{i+1,j}\Delta x_{i-1,j} + u_{i,j-1}\Delta x_{i,j-1} + u_{i+1,j-1}\Delta x_{i-1,j-1}}{\Delta x_{i,j} + \Delta x_{i-1,j} + \Delta x_{i,j-1} + \Delta x_{i-1,j-1}} \quad (5.9)$$

$$u^{**} = \frac{u_{i,j+1}\Delta x_{i,j+1} + u_{i+1,j+1}\Delta x_{i-1,j+1} + u_{i,j}\Delta x_{i,j} + u_{i+1,j}\Delta x_{i-1,j}}{\Delta x_{i,j+1} + \Delta x_{i-1,j+1} + \Delta x_{i,j} + \Delta x_{i-1,j}} \quad (5.10)$$

Diskretizacija 3. člena:

$$-gh \frac{\partial h}{\partial x} = -gH_{i,j} \frac{H^{**} - H^*}{\Delta x_{i,j}/2 + \Delta x_{i-1,j}/2} \quad (5.11)$$

Diskretizacija 4. člena:

$$-gh \frac{\partial z_b}{\partial x} = -gH_{i,j} \frac{z_b^{**} - z_b^*}{\Delta x_{i,j}/2 + \Delta x_{i-1,j}/2} \quad (5.12)$$

pri čemer velja:

$$z_b^* = \frac{(z_b)_{i-1,j} + (z_b)_{i,j}}{2} \quad (5.13)$$

$$z_b^{**} = \frac{(z_b)_{i,j} + (z_b)_{i+1,j}}{2} \quad (5.14)$$

Diskretizacija 5. člena:

$$-ghn_g^2 \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} = -gH_{i,j}n_{g(i,j)}^2 \frac{u_{i,j}\sqrt{u_{i,j}^2 + v_{i,j}^2}}{H_{i,j}^{\frac{4}{3}}} \quad (5.15)$$

Diskretizacija 6. člena:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h v_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{H^{**} v_t \frac{u^{***} - u^{**}}{\Delta x_{i,j}} - H^* v_t \frac{u^{**} - u^*}{\Delta x_{i,j}}}{\Delta x_{i,j} / 2 + \Delta x_{i-1,j} / 2} \quad (5.16)$$

pri čemer velja:

$$u^* = \frac{u_{i-1,j} \Delta x_{i-1,j} + u_{i,j} \Delta x_{i-2,j}}{\Delta x_{i-1,j} + \Delta x_{i-2,j}} \quad (5.17)$$

$$u^{**} = \frac{u_{i,j} \Delta x_{i,j} + u_{i+1,j} \Delta x_{i-1,j}}{\Delta x_{i,j} + \Delta x_{i-1,j}} \quad (5.18)$$

$$u^{***} = \frac{u_{i+1,j} \Delta x_{i+1,j} + u_{i+2,j} \Delta x_{i,j}}{\Delta x_{i+1,j} + \Delta x_{i,j}} \quad (5.19)$$

Diskretizacija 7. člena:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(h v_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{H^{**} v_t \frac{u^{\times} - u^{**}}{\Delta y_{i,j}} - H^* v_t \frac{u^{**} - u^{\times}}{\Delta y_{i,j-1}}}{\Delta y_{i,j} / 2 + \Delta y_{i,j-1} / 2} \quad (5.20)$$

pri čemer velja:

$$u^{\times} = \frac{u_{i,j-1} \Delta x_{i,j-1} + u_{i+1,j-1} \Delta x_{i-1,j-1}}{\Delta x_{i,j-1} + \Delta x_{i-1,j-1}} \quad (5.21)$$

$$u^{\times} = \frac{u_{i,j+1} \Delta x_{i,j+1} + u_{i+1,j+1} \Delta x_{i-1,j+1}}{\Delta x_{i,j+1} + \Delta x_{i-1,j+1}} \quad (5.22)$$

y smer:

Enačba (2.34) se s poenostavljenim zapisom globinsko povprečnih hitrosti ($u = \bar{u}$ in $v = \bar{v}$) glasi:

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_g^2 \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hv_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5.23)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen

Diskretizacija 0. člena:

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} = \frac{\left((H_{i,j} v_{i,j})_{t1} - (H_{i,j} v_{i,j})_{t2} \right)}{\Delta t} \quad (5.24)$$

Diskretizacija 1. člena:

$$\frac{\partial(huv)}{\partial x} = \frac{H^{**} u_{i+1,j} v^{\bullet\bullet} - H^* u_{i,j} v^{\bullet}}{\Delta x_{i,j} / 2 + \Delta x_{i-1,j} / 2} \quad (5.25)$$

pri čemer velja:

$$H^* = \frac{H_{i-1,j} + H_{i,j}}{2} \quad (5.26)$$

$$H^{**} = \frac{H_{i,j} + H_{i+1,j}}{2} \quad (5.27)$$

$$v^{\bullet} = \frac{v_{i-1,j} \Delta y_{i-1,j} + v_{i,j} \Delta y_{i,j} + v_{i-1,j+1} \Delta y_{i-1,j-1} + v_{i,j+1} \Delta y_{i,j-1}}{\Delta y_{i-1,j} + \Delta y_{i,j} + \Delta y_{i-1,j-1} + \Delta y_{i,j-1}} \quad (5.28)$$

$$v^{\bullet\bullet} = \frac{v_{i,j} \Delta y_{i,j} + v_{i+1,j} \Delta y_{i+1,j} + v_{i,j+1} \Delta y_{i,j-1} + v_{i+1,j+1} \Delta y_{i+1,j-1}}{\Delta y_{i,j} + \Delta y_{i+1,j} + \Delta y_{i,j-1} + \Delta y_{i+1,j-1}} \quad (5.29)$$

Diskretizacija 2. člena:

$$\frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = \frac{H^{**} v_{i,j+1} - H^* v_{i,j}}{\Delta y_{i,j} / 2 + \Delta y_{i,j-1} / 2} \quad (5.30)$$

Diskretizacija 3. člena:

$$-gh \frac{\partial h}{\partial y} = -gH_{i,j} \frac{H^{**} - H^*}{\Delta y_{i,j} / 2 + \Delta x_{i,j-1} / 2} \quad (5.31)$$

Diskretizacija 4. člena:

$$-gh \frac{\partial z_b}{\partial y} = -gH_{i,j} \frac{z_b^{\bullet\bullet} - z_b^{\bullet}}{\Delta y_{i,j} / 2 + \Delta y_{i,j-1} / 2} \quad (5.32)$$

pri čemer velja:

$$z_b^* = \frac{(z_b)_{i-1,j} + (z_b)_{i,j}}{2} \quad (5.33)$$

$$z_b^{**} = \frac{(z_b)_{i,j} + (z_b)_{i+1,j}}{2} \quad (5.34)$$

Diskretizacija 5. člena:

$$-ghn_g^2 \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} = -gH_{i,j}n_g^2 \frac{u_{i,j}\sqrt{u_{i,j}^2 + v_{i,j}^2}}{H_{i,j}^{\frac{4}{3}}} \quad (5.35)$$

Diskretizacija 6. člena:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h v_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{H^{**} v_t \frac{v^{***} - v^{**}}{\Delta x_{i,j}} - H^* v_t \frac{v^{**} - v^*}{\Delta x_{i,j}}}{\Delta x_{i,j} / 2 + \Delta x_{i-1,j} / 2} \quad (5.36)$$

pri čemer velja:

$$v^* = \frac{v_{i-1,j} \Delta y_{i-1,j} + v_{i-1,j+1} \Delta y_{i-1,j-1}}{\Delta y_{i-1,j} + \Delta y_{i-1,j-1}} \quad (5.37)$$

$$v^{**} = \frac{v_{i,j} \Delta y_{i,j} + v_{i,j+1} \Delta y_{i,j-1}}{\Delta y_{i,j} + \Delta y_{i,j-1}} \quad (5.38)$$

$$v^{***} = \frac{v_{i+1,j} \Delta y_{i+1,j} + v_{i+1,j+1} \Delta y_{i+1,j-1}}{\Delta y_{i+1,j} + \Delta y_{i+1,j-1}} \quad (5.39)$$

Diskretizacija 7. člena:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(h v_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{H^{**} v_t \frac{v^{\times\text{}} - v^{**}}{\Delta y_{i,j}} - H^* v_t \frac{v^{**} - v^{\times}}{\Delta x_{i,j-1}}}{\Delta y_{i,j} / 2 + \Delta y_{i,j-1} / 2} \quad (5.40)$$

pri čemer velja:

$$v^{\times} = \frac{v_{i,j-1} \Delta y_{i,j-1} + v_{i,j} \Delta y_{i,j-2}}{\Delta y_{i,j-1} + \Delta y_{i,j-2}} \quad (5.41)$$

$$v^{\times\text{}} = \frac{v_{i,j+1} \Delta y_{i,j+1} + v_{i,j+2} \Delta y_{i,j}}{\Delta y_{i,j+1} + \Delta y_{i,j}} \quad (5.42)$$

Podrobno smo analizirali primer izračuna s skupnim pretokom 4000 m³/s, saj predstavlja tipičen primer interakcije toka po strugi in toka po poplavnih področjih. Izračun smo izvršili s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$ ter z vrednostmi Manningovih koeficientov za umerjeno stanje modela. Analizirali smo razmere v času 10 ur po začetku simulacije, ko se že vzpostavi stalni tok. Razpored deležev posameznih členov po območju modela je grafično prikazan v **prilogah B.10 do B.25**. Podrobneje bo opisan delež posameznih členov v y smeri (približno v smeri toka).

Kot je bilo že omenjeno, je tok v modelu po času 10 h že ustaljen, zato je bilo pričakovati, da bo delež 0. člena (enačba 5.24), ki predstavlja spremembo produkta hitrosti in globine vode v časovnem koraku, neznaten. Izračun je to potrdil, saj je na le 0,2 % poplavljenega območja delež 0. člena večji od 1 % (**priloga B.10**). Največje vrednosti se pojavljajo na levem poplavnem področju pod profilom P120, kjer so hitrosti in gladine v posameznih točkah izredno majhne. V tem primeru lahko pride na mejah poplavljenega območja do pojava suhih/mokrih celic, ko je v enem časovnem koraku celica mokra, v naslednjem pa suha. Ker 0. člen opisuje spremembo produkta globine vode in hitrosti v časovnem koraku, lahko v takšnih posameznih celicah vrednost tega člena doseže znaten vpliv. Seveda takšen minimalen lokalni vpliv v posameznih točkah na robu poplavljenega območja nima prav nobenega vpliva na globalna globinska stanja oz. hitrostno sliko.

1. in 2. člen dinamične enačbe, ki predstavljata vpliv vztrajnostnih sil, imata precej podoben vplivni delež v enačbi. Vpliv 1. člena med 1-5 % pokriva največji del poplavljenega območja in sicer kar 33,0 % . Podoben delež površine (29,6 %) pokriva vpliv 2. člena v območju med 1 % in 5 %. Vplivni delež 1. člena nad 40 % pokriva le zanemarljivih 0,1 % površine, podobno je z vplivnim deležem 2. člena. Največji vpliv vztrajnostnih sil se pojavi v območju struge in območjih iztekanja vode iz struge na poplavna področja (iztekanje na desno poplavno področje nad jezom NEK, iztekanje na levo poplavno področje pod profilom P113 – mesto bodočega razbremenilnika visokih vod). Iz zapisanega in iz grafičnih **prilog B.11** in **B.12** sledi, da je vpliv vztrajnostnih sil znaten, približno do 20 %.

Člena 3 in 4 opisujeta vpliv gravitacijskih sil. Njun delež je skoraj po celem območju prevladujoč, saj vsak zase predstavlja vplivni delež med 40 in 50 % (**prilogi B.13** in **B.14**). Nekoliko manjši vplivni delež predstavljata le na mestih, kjer je povečan vpliv 1. in 2. člena, tj. na mestu iztekanja na desno poplavno področje nad jezom NEK ter na mestu iztekanja na levo poplavno področje pod profilom P113. Prav tako je njun delež manjši nad in pod profilom 120 na levem bregu, kjer voda izteka iz struge in kjer je največji vpliv 5. člena.

5. člen v dinamični enačbi predstavlja vpliv sile zaradi upora. Največje vrednosti deleža v dinamični enačbi ta člen predstavlja na območjih, kjer voda izteka iz glavne struge na poplavna področja (do 40 %, na 1,2 % poplavljenega območja tudi nad 40 %). Na teh mestih so hitrosti vode razmeroma velike, velikost člena pa se veča s kvadratom hitrosti. S kvadratno odvisnostjo je velikost tega člena povezana tudi z Manningovim koeficientom hrapavosti. Zato lahko v območju struge, kjer so vrednosti Manningovega koeficienta nizke (med profiloma P115 in P122), opazimo, da je tudi vpliv 5. člena nizek (**priloga B.15**).

Vpliv turbulentnih sil zaradi notranjega trenja v tekočini, ki ga opisujeta 6. in 7. člen, se je izkazal za zanemarljivega. Na le 0,05 % poplavljenih površin je delež 6. člena večji od 1 %, vpliv 7. člena pa je še manjši (**prilogi B.16** in **B.17**). Iz tega sledi pomemben zaključek, in sicer, da lahko v obravnavanem in podobnih primerih toka člena, ki opisujeta vpliv turbulentnih sil v dinamični enačbi, zanemarimo. S tem je tudi detajlneje razložena občutljivostna analiza vpliva konstantne vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti (poglavje 5.3.3) na potek gladin vzdolž modela. Opazen vpliv koeficienta turbulentne viskoznosti na potek gladin je bil namreč zaznan šele pri konstantni vrednosti koeficienta

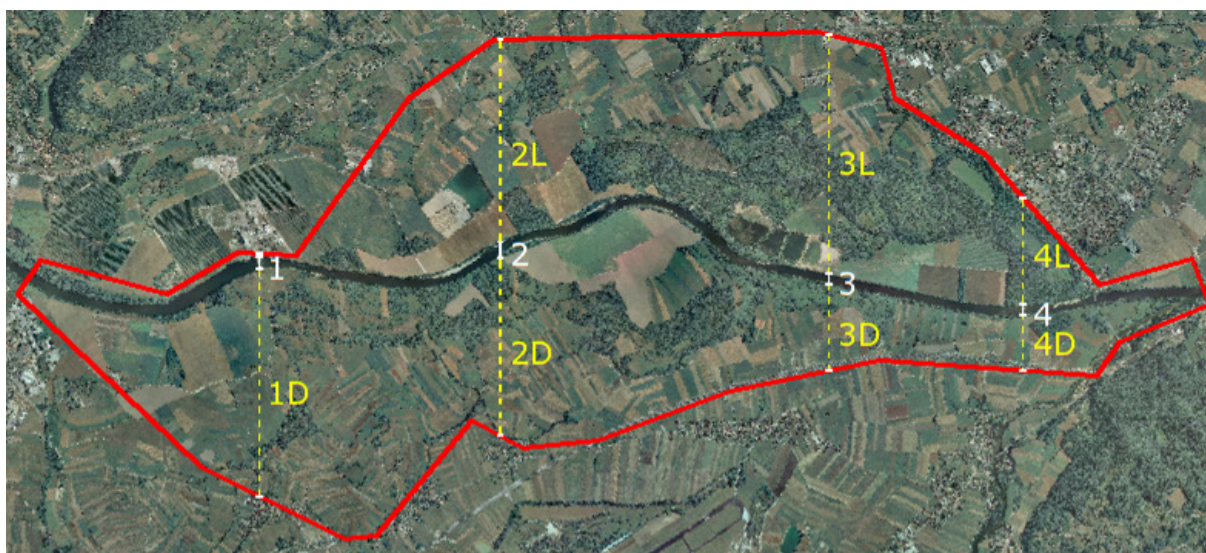
turbulentne viskoznosti $\nu_t = 10 \text{ m}^2/\text{s}$, kar predstavlja 1000 krat večjo vrednost od običajno uporabljene vrednosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$ (uporabljena tudi v zgoraj podrobneje analiziranem primeru).

Podobne ugotovitve veljajo tudi za vrednostih posameznih členov v dinamični enačbi za x smer (približno pravokotno na smer toka). Grafična predstavitev vpliva posameznih členov je predstavljena v **prilogah B.18 do B.25**.

5.4.3 Vodne poti po retenzijskih površinah in izvrednotenje pretokov

Kot je bilo opisano v prejšnjih dveh poglavjih, izbira modela turbulence praktično ne vpliva na rezultate simulacij toka vode v območju bodoče HE Brežice. Zato so v tem poglavju predstavljeni zgolj rezultati simulacij z uporabljenim modelom turbulence s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti. Rezultati se nanašajo na pretoke 2466, 3000, 4000 in 5000 m^3/s , saj pri nižjih dveh opazovanih pretokih (1230 oz. 1595 m^3/s) vsa voda teče po strugi in so posledično retenzijske površine prazne.

Pretočna sposobnost struge ter levega in desnega poplavnega področja je bila določena v 4 značilnih prečnih prerezih. Za predstavitev pretočnosti struge Save so izbrani 4 prerezi v vodotoku (prvi v prečnem profilu jezusa NEK, četrti nad lokacijo predvidene HE Brežice). Na te prečne prereze so navezani prečni prerezi po levi in desni poplavni površini (slika 5.11). Izbrani značilni prečni profili sovpadajo z lokacijami ločilnih zidov, zgrajenih na fizičnem modelu (poglavje 4). Na ta način je omogočena primerjava rezultatov med obema hidravličnima modeloma.



Slika 5.11: Situacijski prikaz izbranih značilnih prečnih prerezov za izvrednotenje pretokov v glavni strugi in po poplavnih površinah.

Figure 5.11: Display of characteristic cross-sections selected for the determination of discharge distribution between the main channel and floodplains.

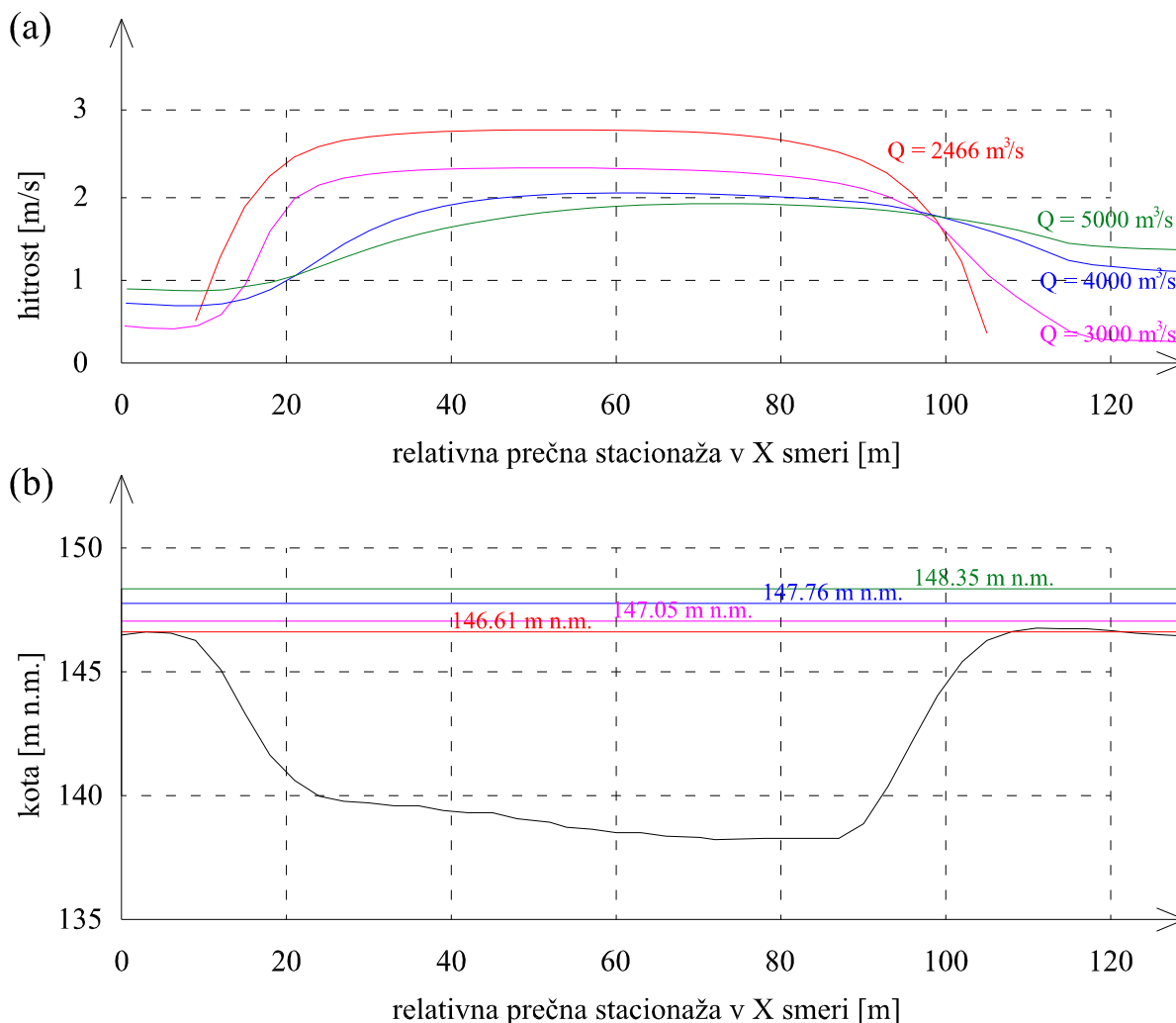
Rezultati simulacij pri visokovodnih pretokih za primer stalnega toka so za značilne prečne prereze (slika 5.11) podani v preglednici 5.2. Profil 1L ni prikazan, saj je pretok vode na levo poplavno področje v profilu NEK preprečen z nasipom.

Preglednica 5.2: Prikaz izračunane razdelitve pretoka med strugo Save in poplavnimi področji v izbranih značilnih prečnih profilih pri visokovodnih pretokih.

Table 5.2: Calculated discharge distribution between the Sava main channel and floodplains in the selected characteristic cross-sections for different flood discharges.

Oznaka prereza	Stacionaža [m]	Pretok Save [m ³ /s]			
		2466	3000	4000	5000
1	745.889	2361	2728	3152	3420
2	743.831	2393	2727	3024	3207
3	740.585	1854	1961	2026	2064
4	738.892	1675	1462	1341	1337
1D	745.889	105	273	848	1579
2D	743.831	74	215	760	1458
3D	740.585	310	531	1136	1693
4D	738.892	344	687	1250	1729
2L	743.831	0	58	176	332
3L	740.585	294	500	790	1228
4L	738.892	410	844	1360	1935

Iz preglednice 5.2 lahko vidimo, da se praktično vzdolž celotnega obravnavanega odseka voda preliva iz struge na poplavna področja. Velik del prelivanja se zgodi nad jezom NEK na desno poplavno področje. Sicer se manjši del prelite vode vrne v strugo pod jezom, vendar večina prelite vode teče po poplavnem področju vzdolž reke Save in se v spodnjem delu modela izliva v Krko. Z večanjem skupnega pretoka se večja tudi količina vode, ki se vzdolž celega modela preliva na desno poplavno področje. Za levi breg je značilno, da se večina vode prelije na poplavno področje nad gramoznicami. Povečanje pretoka v profilu 4L gre pripisati lokalnemu prelivanju iz struge na poplavno področje, ki pa se, skupaj s preostalim tokom vode po levem poplavnem področju, pod brežiško teraso hitro vrne v glavno strugo. Zanimiv je trend padanja pretoka v strugi v profilu 4 z večanjem skupnega pretoka. Pri višjih pretokih se namreč na tem območju pojavi zajezeitev, ki povzroči nižje hitrosti vode v strugi, kar kljub nekoliko večji globini vode vodi do nižjega pretoka v strugi Save. Hitrostni profil v območju glavne struge v prečnem prerezu 4 je za najvišje obravnavane pretoke, ko že pride do razlivanja vode na poplavna področja, prikazan na sliki 5.12. Podrobni rezultati vodnih poti so v obliki tokovnic predstavljeni v **prilogah B.26 do B.29**.



Slika 5.12: (a) hitrostni profil in (b) kote gladine v območju struge v prečnem prerezu 4 za pretoke 2466, 3000, 4000 in $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figure 5.12: (a) velocity profile and (b) water levels in the main channel in cross-section 4 for discharges 2466, 3000, 4000 and $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

V **prilogah B.30 do B.33** so prikazane izračunane globine vode. Te pri največjih pretokih na dolvodnem koncu modela na poplavnem področju presegajo globino treh metrov.

V **prilogah B.34 do B.37** so prikazani izračunani lokalni vektorji hitrosti vode na poplavnih površinah in v strugi. Medtem ko hitrosti na levem poplavnem področju pri višjih pretokih presegajo vrednosti 1 m/s zgolj v ozkem območju vračanja toka v glavno strugo na dolvodnem koncu modela, pa so hitrosti na desnem poplavnem področju večje, tudi preko 2 m/s . Večje hitrosti se pojavijo predvsem na območju prelivanja nad jezom NEK, kjer se velike količine vode pri razmeroma majhnih globinah prelijejo na desno poplavno področje. Hitrosti v glavni strugi dosegaajo vrednosti ca. 3 m/s , na ozkem območju jez NEK pa celo presegajo 4 m/s .

Preglednica 5.3: Modelirano območje HE Brežice – pregled izvršenih računov s predstavljenimi rezultati.

Table 5.3: Modeled area of HPP Brežice - review of the performed simulations with presented results.

Območje HE Brežice - pregled izvršenih računov s predstavljenimi rezultati				
Primer	Pretok Save [m ³ /s]	Prikaz rezultatov	Čas izrisa <i>t</i> [ure]	Priloga
bombac61	2466	Tokovnice	10	B.26
		Izolinije gladine + vektorji hitrosti		B.30
		Izotahe (linije enakih hitrosti) + vektorji hitrosti		B.34
bombac62	3000	Tokovnice	10	B.27
		Izolinije gladine + vektorji hitrosti		B.31
		Izotahe (linije enakih hitrosti) + vektorji hitrosti		B.35
bombac63	4000	Tokovnice	10	B.28
		Izolinije gladine + vektorji hitrosti		B.32
		Izotahe (linije enakih hitrosti) + vektorji hitrosti		B.36
bombac64	5000	Tokovnice	10	B.29
		Izolinije gladine + vektorji hitrosti		B.33
		Izotahe (linije enakih hitrosti) + vektorji hitrosti		B.37

5.4.3.1 Tok vode po retenzijskih površinah pri pretoku 2466 m³/s

Pri pretoku 2466 m³/s so na desni strani trije izrazitejši odseki, na katerih voda prestopa desni breg in teče po poplavnem področju vzdolž reke Save in se izliva v Krko. Vzdolž celotnega modeliranega odseka Save je sicer še nekaj manjših področij izmenjav vode med strugo in desnim poplavnim področjem, ki pa nimajo večjega pomena in jih zato ne opisujemo podrobneje.

Prvi odsek prelivanja se nahaja nad jezom NEK od rečnega profila P108 do rečnega profila P110 v dolžini 0,25 km. Pretok vode na tem odseku znaša 105 m³/s oz. 4,3 % celotnega pretoka Save. Drugi odsek, na katerem se voda preliva čez desni breg, sega od rečnega profila P119a do rečnega profila P120 v dolžini 0,30 km. Pretok vode v tem delu znaša 94 m³/s oz. 3,8 % skupnega pretoka. Tretji odsek prelivanja na desno poplavno področje sega od rečnega profila P121a do rečnega profila P123 v dolžini 0,77 km. Pretok vode na tem odseku znaša 132 m³/s oz. 5,4 % celotnega pretoka Save. Skupni pretok na desni poplavni površini znaša 344 m³/s, kar pomeni 13,9 % skupnega pretoka.

Levi breg struge voda prestopi na odseku med rečnima profiloma P119a in P121 (nad gramoznico) v dolžini 0,52 km. Pretok vode na tem odseku znaša 261 m³/s oz. 10,6 % skupnega pretoka Save. Voda, ki teče po levi poplavni površini, se vrača nazaj v strugo v ozkem pasu pod brežiško teraso. Do lokalne izmenjave med tokom vode v strugi in tokom vode po levem poplavnem področju prihaja tudi

dolvodno od rečnega profila P124a, do brežiške terase. Na tem relativno kratkem odseku se voda lokalno prelije iz struge na poplavno področje, nato pa se hitro vrne nazaj v strugo.

Pri pretoku Save $2466 \text{ m}^3/\text{s}$ znaša skupni pretok vode po desni in levi poplavni površini $605 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 24,5 % skupnega pretoka. Pretok vode po strugi v območju pod gramoznico pri Brežicah, ko se praktično že vsa voda razlije na poplavne površine, znaša $1861 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 75,5 %. Del te vode se pod rečnim profilom P124a razlija na levo poplavno površino, vendar v relativno ozkem pasu in se kmalu vrača nazaj v strugo.

Tokovnice pri pretoku $2466 \text{ m}^3/\text{s}$ so prikazane v **prilogi B.26**. Izračunane globine vode pri pretoku $2466 \text{ m}^3/\text{s}$ so prikazane v **prilogi B.30**. Hitrosti vode na poplavnih površinah in v strugi so za ta pretok prikazane v **prilogi B.34**.

5.4.3.2 Tok vode po retenzijskih površinah pri pretoku $3000 \text{ m}^3/\text{s}$

Tako kot pri nižjem pretoku so tudi pri pretoku $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ na desni strani trije izrazitejši odseki, na katerih voda prestopa desni breg in teče po poplavnem področju vzdolž reke Save in se izlija v Krko. Do lokalnega prelivanja vode iz struge Save v Krko prihaja tudi na skrajnem dolvodnem koncu modela. Vzdolž celotnega modeliranega odseka Save je sicer še nekaj manjših področij izmenjav vode med strugo in desnim poplavnim področjem, ki pa nimajo večjega pomena in jih zato ne bomo podrobneje opisovali.

Prvi odsek prelivanja se nahaja nad jezom NEK med rečnima profiloma P108 in P110 v dolžini 0,26 km. Pretok vode na tem odseku znaša $272 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 9,1 % celotnega pretoka Save. Drugi odsek, na katerem se voda prelija čez desni breg, sega od rečnega profila P118 do rečnega profila P120 v dolžini 0,75 km. Pretok vode v tem delu znaša $214 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 7,1 % skupnega pretoka. Tretji odsek prelivanja na desno poplavno področje se nahaja v območju med rečnima profiloma P125a in P126 v dolžini 0,49 km. Pretok vode na tem odseku znaša $147 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 4,8 % celotnega pretoka Save. Na skrajno dolvodnem delu modela prihaja do lokalnega prelivanja iz struge Save med rečnima profiloma P126e in P128. Na tem odseku se iz struge prelije razmeroma velik del pretoka, 14,5 % oz. $435 \text{ m}^3/\text{s}$, ki pa se kmalu vrne nazaj v strugo. Skupni pretok na desni poplavni površini v kontrolnem prečnem prerezu 4 (slika 5.11) znaša $687 \text{ m}^3/\text{s}$, kar pomeni 22,9 % skupnega pretoka.

Levi breg struge Save voda v manjši meri prestopi že na daljšem odseku med rečnima profiloma P113 in P119. Na tem odseku se iz struge prelije $141 \text{ m}^3/\text{s}$ oz. 4,7 % skupnega pretoka Save. Do izrazitejšega prelivanja na levo poplavno površino pride na razmeroma kratkem odseku nad gramoznico med rečnima profiloma P119a in P121 v dolžini 0,50 km. Pretok vode na tem odseku znaša $357 \text{ m}^3/\text{s}$, kar skupaj z gorvodno prelito količino vode znaša že $498 \text{ m}^3/\text{s}$ oziroma 16,6 % skupnega pretoka Save. Voda, ki teče po levi poplavni površini, se vrača nazaj v strugo v ozkem pasu pod brežiško teraso. Do lokalne izmenjave med tokom vode v strugi in tokom vode po levem poplavnem področju prihaja tudi dolvodno od rečnega profila P124, do brežiške terase. Na tem

relativno kratkem odseku se voda lokalno prelije iz struge na poplavno področje, nato pa se hitro vrne nazaj v strugo.

Pri pretoku Save 3000 m³/s znaša skupni pretok vode po desni in levi poplavni površini 1185 m³/s oz. 39,5 % skupnega pretoka. Glede na prejšnji opisani primer z manjšim skupnim pretokom Save (2466 m³/s), je v tem primeru pretok vode po poplavnih površinah bistveno večji (za 580 m³/s oz. 95,9 %). Tudi relativno gledano glede na skupni pretok se je pretok po poplavnih površinah, glede na primer s pretokom 2466 m³/s, povečal za 15,0 % (s 24,5 % na 39,5 %).

Tokovnice pri pretoku 3000 m³/s so prikazane v **prilogi B.27**. Izračunane globine vode pri pretoku 3000 m³/s so prikazane v **prilogi B.31**. Hitrosti vode na poplavnih površinah in v strugi so za ta pretok prikazane v **prilogi B.35**.

5.4.3.3 Tok vode po retenzijskih površinah pri pretoku 4000 m³/s

Pri skupnem pretoku Save 4000 m³/s sta, poleg lokalnega prelivanja na skrajno dolvodnem koncu modela, na desni strani dva izrazitejša odseka, na katerih voda prestopa desni breg in teče po poplavnem področju vzdolž reke Save. Vzdolž celotnega modeliranega odseka Save je sicer še nekaj manjših področij izmenjav vode med strugo in desnim poplavnim področjem, ki pa nimajo večjega pomena in jih zato ne bomo podrobneje opisovali.

Prvi odsek prelivanja se nahaja med rečnim profilom P108 in jezom NEK v dolžini 0,64 km. Pretok vode na tem odseku znaša 848 m³/s oz. 21,2 % celotnega pretoka Save. Drugi izrazitejši odsek, na katerem se voda prelija čez desni breg, se nahaja med rečnima profiloma P118 in P120 v dolžini 0,75 km. Pretok vode v tem delu znaša 271 m³/s oz. 6,8 % skupnega pretoka. Med rečnima profiloma P123 in P125 se manjši del vode iz desne poplavne površine vrne nazaj v strugo Save. Podobno kot pri manjših dveh pretokih, se tudi pri pretoku 4000 m³/s na skrajno dolvodnem delu modela voda lokalno prelija iz struge Save na desno poplavno področje, od koder se razmeroma hitro vrne nazaj v strugo. Skupni pretok na desni poplavni površini v kontrolnem prečnem prerezu 4 (slika 5.11) znaša 1250 m³/s, kar pomeni 31,3 % skupnega pretoka.

Tokovna slika na levem poplavnem področju je pri pretoku 4000 m³/s podobna, kot pri manjših dveh že opisanih pretokih. Levi breg struge Save voda v manjši meri prestopi že na daljšem odseku med rečnima profiloma P113 in P119. Na tem odseku se iz struge prelije 273 m³/s oz. 6,8 % skupnega pretoka Save. Do izrazitejšega prelivanja na levo poplavno površino pride na razmeroma kratkem odseku nad gramoznico med rečnima profiloma P119a in P121 v dolžini 0,50 km. Pretok vode na tem odseku znaša 515 m³/s, kar skupaj z gorvodno prelito količino vode znaša že 788 m³/s oziroma 19,7 % skupnega pretoka Save. Voda, ki teče po levi poplavni površini, se vrača nazaj v strugo v ozkem pasu pod brežiško teraso. Do lokalne izmenjave med tokom vode v strugi in tokom vode po levem poplavnem področju prihaja tudi dolvodno od rečnega profila P123, do brežiške terase. Na tem relativno kratkem odseku se voda lokalno prelije iz struge na poplavno področje, nato pa se hitro vrne nazaj v strugo.

Pri pretoku Save 4000 m³/s znaša skupni pretok vode po desni in levi poplavni površini 2038 m³/s oz. 51,0 % skupnega pretoka. Glede na prejšnja dva opisana primera z manjšim skupnim pretokom Save, je v tem primeru pretok vode po poplavnih površinah bistveno večji. Predvsem se je zelo povečal pretok po desni poplavni površini, medtem ko je povečanje pretoka po levi poplavni površini manjše. Tudi relativno gledano se je pretok po poplavnih površinah glede na prejšnja primera povečal.

Tokovnice pri pretoku 4000 m³/s so prikazane v **prilogi B.28**. Izračunane globine vode pri pretoku 4000 m³/s so prikazane v **prilogi B.32**. Hitrosti vode na poplavnih površinah in v strugi so za ta pretok prikazane v **prilogi B.36**.

5.4.3.4 Tok vode po retenzijskih površinah pri pretoku 5000 m³/s

Pri skupnem pretoku Save 5000 m³/s se voda na desno poplavno površino v večji meri razliva zgolj nad jezo NEK. V primerjavi z razlivanji pri manjših pretokih je v tem primeru območje prelivanja vode obsežnejše, saj je prelivanje na desno poplavno površino prisotno vse od zgornjega roba modela. Območje prelivanja od začetka modela do jezu NEK je dolgo 2,08 km. Na tem odseku se na desno poplavno površino prelije 1579 m³/s oz. 21,2 % celotnega pretoka Save. Velika večina prelite vode potem teče približno vzporedno z glavno strugo in se šele na skrajnem dolvodnem koncu modela vrne v strugo Save oz. se prelije v Krko. Vzdolž celotnega modeliranega odseka Save je sicer še nekaj manjših področij izmenjav vode med strugo in desnim poplavnim področjem, ki pa nimajo večjega pomena in jih zato ne opisujemo podrobneje.

Voda se na levo poplavno področje preliva na razmeroma dolgem odseku od rečnega profila P113 do rečnega profila P121. Podobno kot pri primerih z manjšim pretokom se glavnina vode prelije tik nad gramoznico, med profiloma P119a in P121. Skupna količina prelite vode na tem odseku znaša 1224 m³/s oz. 24,5 %. Voda, ki teče po levi poplavni površini, se vrača nazaj v strugo v ozkem pasu pod brežiško teraso. Do lokalne izmenjave med tokom vode v strugi in tokom vode po levem poplavnem področju prihaja tudi dolvodno od rečnega profila P123, do brežiške terase. Na tem relativno kratkem odseku se voda lokalno prelije iz struge na poplavno področje, nato pa se hitro vrne nazaj v strugo.

Pri pretoku Save 5000 m³/s znaša skupni pretok vode po desni in levi poplavni površini 2803 m³/s oz. 56,1 % skupnega pretoka. Glede na prejšnje opisane primere z manjšim skupnim pretokom Save se nadaljuje trend povečevanja pretoka po poplavnih površinah, tako v absolutnem, kot tudi v relativnem smislu.

Tokovnice pri pretoku 5000 m³/s so prikazane v **prilogi B.29**. Izračunane globine vode pri pretoku 5000 m³/s so prikazane v **prilogi B.33**. Hitrosti vode na poplavnih površinah in v strugi so za ta pretok prikazane v **prilogi B.37**.

5.4.3.5 Primerjava izračunane tokovne slike in pretokov z rezultati fizičnega modela

S primerjavo med z matematičnim modelom izračunano tokovno sliko in izmerjeno oz. opazovano tokovno sliko na fizičnem modelu lahko ocenimo pravilnost numeričnih simulacij. S tem namenom so v **prilogah B.38 do B.40** na enem mestu prikazane tokovnice, dobljene z obema modeloma. S kvalitativno primerjavo vidimo, da je v splošnem ujemanje med obema modeloma dobro. Mesta prelivanja vode na poplavna področja, tok po poplavnih področjih ter lokacije vračanja toka v glavno strugo se zelo dobro ujemajo. Za detajlnejšo primerjavo je potrebno primerjati količine vode na posameznem področju. Količina prelite vode na poplavna področja je odvisna od gladin vode v strugi oziroma na celotnem obravnavanem območju. Vemo (poglavje 5.3.2), da popolno ujemanje med izračunanimi gladinami z matematičnim modelom in izmerjenimi gladinami na fizičnem modelu ni bilo doseženo, zato so določene razlike v pretokih po poplavnih površinah pričakovane. Naj na tem mestu še enkrat poudarimo, da ni bil namen z matematičnim modelom natančno reproducirati rezultate meritev na fizičnem modelu, temveč razmejiti oz. določiti vpliv posameznih koeficientov, ki nastopajo v matematičnem modelu. Rezultati meritev nekega vmesnega stanja na fizičnem modelu so služili zgolj za grobo umerjanje in verifikacijo matematičnega modela. V tem kontekstu je potrebno tudi razumeti predstavljene rezultate, ki nikakor niso dokončni in jih ne smemo aplicirati na stanje v naravi.

Primerjava izračunanih in izmerjenih pretokov po poplavnih površinah in v strugi je prikazana v preglednici 5.4. Izvrednotenje pretoka v poljubnem profilu je z orodjem matematičnega modela PCFLOW2D razmeroma preprosto. V programskem vmesniku zgolj definiramo računske celice, med katerimi želimo izvrednotiti pretok. Drugače je z meritvami na fizičnem modelu, saj je bilo potrebno za izvrednotenje pretoka v posameznem profilu predelati model oz. zgraditi ločilni zid, ki je želeni del pretoka preusmeril na posebej za ta namen vzpostavljeno merilno mesto. Zato so bili ločilni zidovi vzpostavljeni samo na ključnih mestih. Tako je bil v posameznem opazovanem značilnem profilu ločen zgolj tok po eni poplavni površini od preostalega toka v strugi in po drugem poplavnem področju. Iz tega razloga so določena polja v preglednici 5.4, ki prikazujejo pretok v značilnem prečnem profilu na fizičnem modelu, prazna.

Primerjava izmerjenih in izračunanih pretokov v strugi je mogoča zgolj v prečnem profilu 1 (na mestu jezu NEK). Ujemanje med rezultati obeh modelov je zelo dobro. Največja razlika nastopi pri simulaciji najmanjšega primerjanega pretoka $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, za katerega je bil s programom PCFLOW2D izračunan 4,5 % nižji pretok. Primerjava prelivanja na desno poplavno površino nad jezom NEK izkazuje relativno veliko odstopanje pri pretoku $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, vendar je absolutno razhajanje majhno, zgolj $136 \text{ m}^3/\text{s}$ ali že omenjenih 4,5 % skupnega pretoka. Pri pretokih, ko se voda začne prelivati iz struge na poplavne površine, že zelo majhne razlike v gladini vode vodijo do relativno velikih razlik prelitih pretokov (pri neki mejni koti lahko znaša pretok po poplavni površini samo $1 \text{ m}^3/\text{s}$, pri zgolj 10 cm višji koti pa že $100 \text{ m}^3/\text{s}$ – razlika 10000 %, kar pa ob skupnem pretoku nekaj tisoč kubičnih metrov na sekundo vseeno pomeni relativno dobro ujemanje). Zato so izvrednotene razlike pretokov v preglednici 5.4 postavljene v bolj smiseln kontekst in je primerjava izvedena glede na skupni pretok Save. Izvrednotene razlike v pretokih so v veliki meri posledica z matematičnim modelom izračunanih nekoliko višjih gladin na mestu prelivanja na desno poplavno površino.

Preglednica 5.4: Primerjava izračunanih (matematični model) in izmerjenih (fizični model) pretokov po poplavnih površinah in v strugi v izbranih značilnih prečnih profilih pri visokovodnih pretokih.

Table 5.4: Comparison of the calculated (mathematical model) and measured (physical model) discharges on the floodplains and in the main channel in the selected characteristic cross-sections for different flood discharges.

	MATEMATIČNI MODEL			FIZIČNI MODEL			MAT. – FIZ. absolutna razlika [m ³ /s]			MAT. – FIZ. razlika v % skupnega Q [%]		
Oznaka prereza	Pretok Save [m ³ /s]			Pretok Save [m ³ /s]			Pretok Save [m ³ /s]			Pretok Save [m ³ /s]		
	3000	4000	5000	3000	4000	5000	3000	4000	5000	3000	4000	5000
1	2728	3152	3420	2864	3251	3463	-136	-99	-43	-4.5	-2.5	-0.9
2	2727	3024	3207									
3	1961	2026	2064									
4	1462	1341	1337									
1D	272	848	1579	136	749	1537	136	99	42	4.5	2.5	0.8
2D	215	760	1458	181	850	1604	34	-90	-146	1.1	-2.2	-2.9
3D	531	1136	1693									
4D	687	1250	1729	633	1095	1431	54	155	298	1.8	3.9	6.0
2L	58	176	332									
3L	500	790	1228	352	661	999	148	129	229	4.9	3.2	4.6
4L	844	1360	1935									

V prečnem profilu 2 (na mestu rečnega profila P116) smo na fizičnem modelu izmerili količino vode, ki teče po desnem poplavnem področju. Na fizičnem modelu je bil pri skupnem pretoku 3000 m³/s izmerjen za 34 m³/s manjši pretok po desnem poplavnem področju. Z višanjem skupnega pretoka se trend obrne, saj so bili pretoki na fizičnem modelu večji od tistih na matematičnem modelu.

V prečnem profilu 3 smo na fizičnem modelu zajeli in izmerili količino vode, ki se na levo poplavno področje preliva med protipoplavnim nasipom dolvodno od NEK in gramoznico. V tem profilu so bili pretoki, izmerjeni na fizičnem modelu, za vse tri skupne pretoke manjši od izračunanih. Pri najmanjšem pretoku 3000 m³/s, ko so razlike največje, to pomeni, da teče po levi poplavni površini 4,9 % manj pretoka.

Tudi v prečnem profilu 4 je bil pri pretoku 5000 m³/s na fizičnem modelu po desni poplavni površini izmerjen manjši pretok, in sicer za 6,0 %. Glede na manjše izmerjene količine vode tako na levem kot desnem poplavnem področju v spodnjem delu obravnavanega območja (profila 3 in 4), so pretoki v strugi na fizičnem modelu očitno večji od izračunanih. Ob dokaj podobnih kotah gladine vode je to mogoče le ob večjih hitrostih v strugi Save. Za boljše primerjavo izračunanih hitrosti z matematičnim modelom v strugi pa žal manjkajo meritve hitrosti v strugi na fizičnem modelu.

5.5 Zaključki glede uporabe 2D matematičnega modela pri modeliranju toka na modelu Brežice

Izračuni z 2D matematičnim modelom PCFLOW2D so potrdili, da se lahko ob primernih podatkih za umerjanje s takšnim modelom dobro simulira tokove v rekah s poplavnimi področji. Ujemanje rezultatov fizičnega in matematičnega modela je zelo dobro. To je bilo seveda pričakovati, saj je bil matematični model umerjen na rezultate fizičnega. V praksi pa žal vse prevečkrat manjka podatkov iz meritev v naravi. Pri načrtovanju pomembnih in občutljivih posegov v rečno okolje se z namenom doseganja večjega zaupanja v rezultate pogosto uporablja hibridno hidravlično modeliranje. Tak pristop združuje prednosti obeh načinov modeliranja: s fizičnim modelom se lahko natančno opiše tridimenzionalne pojave ter zajame vpliv turbulence, npr. na območjih hidravličnih objektov (pretočna krivulja prelivnih polj pregrade, vpliv zaježitve pri mostnih opornikih, ipd.); z matematičnim modelom pa se lažje obravnava velika območja ter izdelava veliko število variant projektiranega stanja (Rak in sod., 2011).

Opravljen analiza vpliva koeficienta hrapavosti na posameznih območjih je nazorno prikazala majhen vpliv spremembe koeficienta na območjih z majhnimi hitrostmi in obratno. Ker je vpliv spremembe vrednosti koeficienta hrapavosti na posameznem področju natančno ovrednoten, nam to vedenje omogoča hitrejša in boljše umerjanje matematičnih modelov v prihodnje. Poleg tega nam daje večje zaupanje v rezultate matematičnih modelov za primere, kjer tako obsežnih podatkov iz meritev navadno ni in se je pri umerjanju modela potrebno zanesti na izkušnje, dobljene pri modeliranju podobnih pojavov.

Analiza vpliva koeficienta turbulentne viskoznosti je pokazala, da je ob dani topografiji in razmerju globin vode na poplavnih površinah in v strugi za velika območja, kakršno je tudi obravnavano območje HE Brežice, vpliv koeficienta turbulentne viskoznosti neznamen; seveda ob predpostavki, da je izbrana vrednost pravega velikostnega reda. V našem primeru je šele 1000x večja vrednost od izbrane ($\nu_t = 1000 * \nu_t(\text{osnovni}) = 1000 * 0.01 \text{ m}^2/\text{s} = 10.0 \text{ m}^2/\text{s}$) povzročila opaznejši dvig gladin. Posledično za obravnavani primer ni smiselna uporaba splošnejšega (in časovno bolj potratnega) modela turbulence, ki natančneje izračuna prostorsko razporeditev koeficienta efektivne turbulentne viskoznosti. To je potrdila tudi primerjava rezultatov različnih vgrajenih modelov turbulence v PCFLOW2D. Tudi podrobnejša analiza posameznih členov, ki nastopajo v dinamični enačbi, je potrdila izsledke opravljene analize. Nekateri avtorji (Rodi, 1993) ugotavljajo, da se lahko v primerih obravnave večjih vodnih mas člene v dinamični enačbi, ki opisujejo vpliv turbulence, enostavno zanemari.

Se pa v praksi pogosto pojavijo tokovi, kjer je vpliv turbulence velik. Eden takšnih primerov je tok vode v ribji stezi, ki jo je potrebno zgraditi pri zaježitvi reke s HE. Tudi v obravnavanem primeru območja bodoče HE Brežice je predvidena ribja steza, ki bo omogočala prehod ribam iz dolvodne struge v gorvodno. V naslednjem poglavju je zato obravnavan izrazito turbulenten tok vode v ribji stezi Blanca, ki je gorvodno ležeča HE na odseku spodnje Save.

6 FIZIČNI MODEL RIBJE STEZE

Za tretji primer praktične uporabe dvodimenzionalnega matematičnega modela PCFLOW2D smo izbrali simulacijo toka v ribji stezi Blanca. Narava toka v obravnavanem tipu ribje steze je izrazito turbulentna, zato je v tem primeru pravilno modeliranje turbulence bistvenega pomena. Na fizičnem modelu ribje steze v pomanjšanem merilu, zgrajenem posebej za potrebe naloge, smo opravili številne meritve, ki so predstavljale osnovo za oceno točnosti posameznega modela turbulence. Na tem primeru smo tudi podrobneje analizirali parametre modelov turbulence.

6.1 Splošno

Z izgradnjo hidroelektrarn in zaježitvijo reke se prekinejo migracijske poti rib. Migracije pa so za ribe življenjskega pomena, saj v svojem življenjskem ciklu potrebujejo različne habitate. Zato je ribam nujno omogočiti prehod pregrade v reki (HESS, 2010). To se izvede z ribjo stezo, ki pa mora biti pravilno dimenzionirana, saj so ribe zelo občutljive na hidrodinamiko toka v njih. Posebnega pomena so maksimalna hitrost vode v ribji stezi, višinska razlika med posameznimi bazeni, globina vode ter turbulentna kinetična energija in njena disipacija (Clay, 1995; Powers in sod., 1984; Enders in sod., 2003).

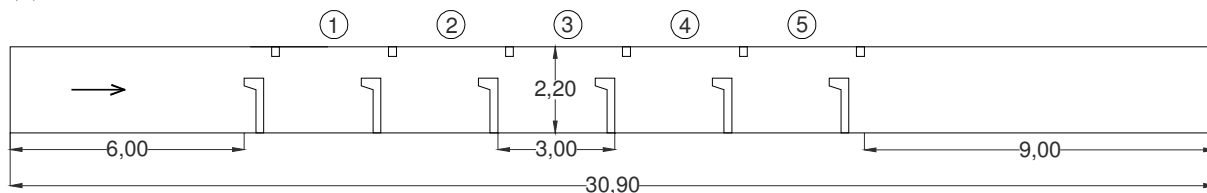
V laboratoriju Inštituta za hidravlične raziskave je bil zgrajen model ribje steze Blanca, ki je prvi prehod za vodne organizme na verigi HE na spodnji Savi. Gre za vrsto ribje steze z vertikalnimi režami, kjer je tok izrazito dvodimenzionalen, tj. vertikalna komponenta hitrosti je za red velikosti manjša od horizontalnih (Liu in sod., 2006; Puertas in sod., 2004; Rajaratnam in sod., 1986; Wu in sod., 1999, Pena in sod., 2004; Tarrade in sod., 2008). Dejstvo, da je tok v takšni ribji stezi dvodimenzionalen, odpira možnost simulacij toka z 2D matematičnimi modeli. Z uporabo globinsko povprečnih numeričnih modelov so številni avtorji (Cea in sod., 2007; Chorda in sod., 2010; Violeau, 2012) dobili dobro ujemanje z meritvami v ribjih stezah z vertikalnimi režami bodisi v naravi ali na modelu. Z meritvami na fizičnem modelu ribje steze Blanca smo dobili dobre podatke o lastnostih toka. Tako pridobljeni podatki so služili kot verifikacija matematičnega modela PCFLOW2D in predvsem za oceno primernosti vgrajenih modelov turbulence.

6.2 Opis modela

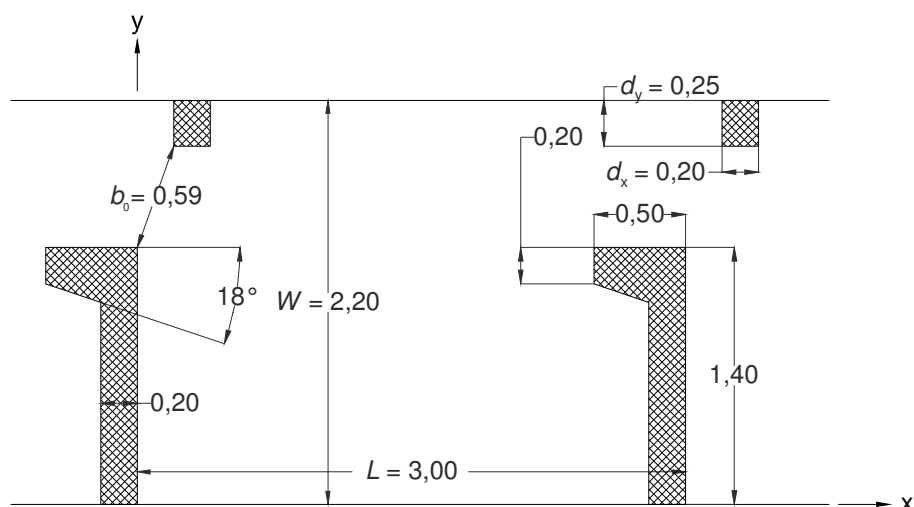
Zgornji del ribje steze Blanca je zgrajen v pravokotnem kanalu širine $W = 2,2$ m z vzdolžnim padcem $S_0 = 0,0167$. Sestavlja ga 24 prekatov dolžine $L = 3,0$ m, ki so med seboj povezani z vertikalnimi režami širine $b_0 = 0,59$ m (slika 6.2a) (Josipovič in Ciuha, 2009). Tako fizični kot matematični model zajemata 5 prekatov, kar skupaj s 6,0 m dolgim natočnim delom in 9,0 m dolgim iztočnim delom predstavlja 30,9 m dolgo modelirano območje. Izbran obseg modela zagotavlja, da so tokovne razmere v srednjem prekatu neodvisne od tokovne slike na dotoku in iztoku iz modela (Liu in sod., 2006;

Chorda in sod., 2010). Posledično so bile vse detaljne meritve toka opravljene v tretjem (srednjem) prekatu.

(a)



(b)



Slika 6.1: Geometrija ribje steze Blanca v naravnem merilu: (a) tloris in (b) detajli prekata. Dimenzije so v metrih.

Figure 6.1: Prototype geometry of the vertical slot fishway Blanca: (a) plan view, and (b) details of slot and pool. Dimensions in meters.

Fizični model ribje steze je bil zgrajen v 0,5 m širokem steklenem žlebu Inštituta za hidravlične raziskave (slika 6.2b). Modelno merilo je tako znašalo:

$$\lambda = \frac{2,2 \text{ m}}{0,5 \text{ m}} = 4,4 \quad (6.1)$$

Za prenos izmerjenih količin z modela na prototip je bil upoštevan Froudov kriterij modelne podobnosti s parametri (Kobus, 1980):

- za dolžino..... $\lambda^1 = 4,4$
- za površino..... $\lambda^2 = 19,36$
- za prostornino $\lambda^3 = 85,184$
- za hitrost $\lambda^{1/2} = 2,098$
- za čas..... $\lambda^{1/2} = 2,098$
- za pretok $\lambda^{5/2} = 40,610$
- za hrapavost $\lambda^{1/6} = 1,280$

(a)



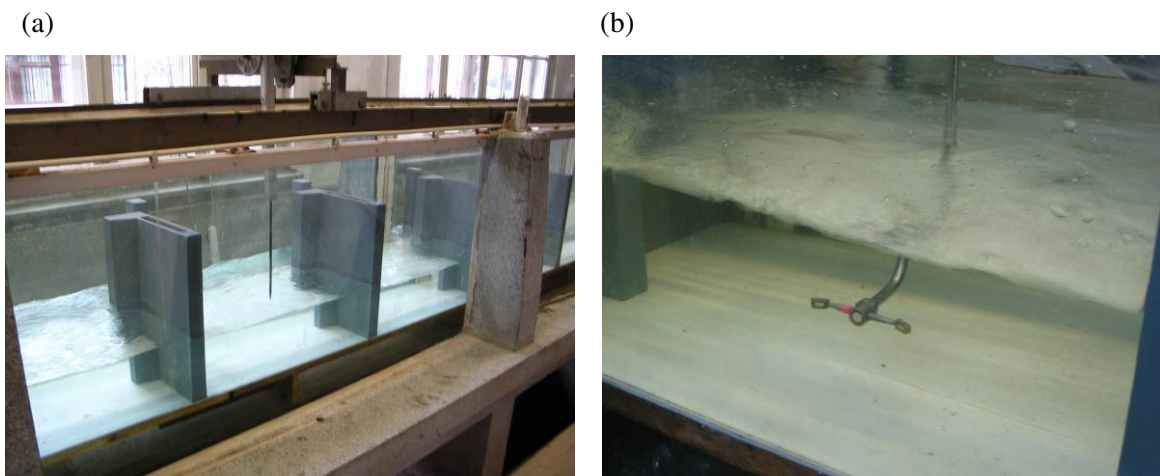
(b)



Slika 6.2: (a) vtočni objekt ribje steze Blanca v naravi in (b) fizični model ribje steze Blanca v steklenem merilnem žlebu.

Figure 6.2: (a) the intake part of vertical slot fishway Blanca and (b) physical model of the vertical slot fishway Blanca in glass flume.

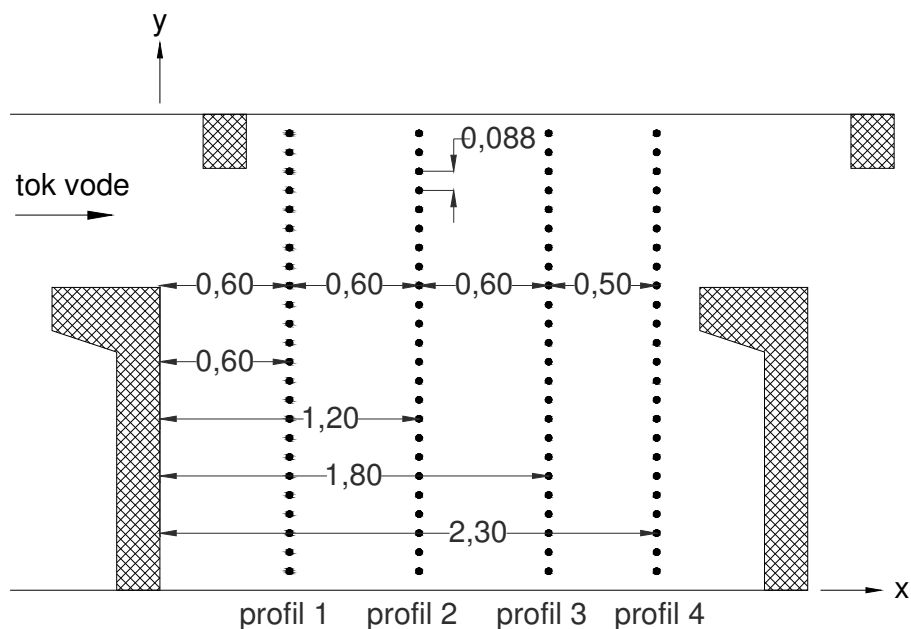
Detajlne meritve smo opravili pri pretoku $Q = 600$ l/s (za prototip) oz. 14,77 l/s za model. Meritve dotoka na fizični model so bile izvedene na trikotnih Thompsonovih merilnih jezovih (slika 4.3). Absolutno odstopanje pretoka od nastavljenega je pri 95 % stopnji zaupanja znašalo največ $\pm 1,5$ % trenutne vrednosti. Regulacija globine vode na spodnjem robu modela je bila izvedena z višinsko nastavljivim ostrorobim pravokotnim jezo. Gladine so bile merjene z ostnim merilom (slika 6.3a), z resolucijo odčitavanja 0,1 mm. Hitrosti vode so bile v posameznih točkah merjene z 2D ultrazvočnim odjemnikom (ADV sonda – Acoustic Doppler Velocimeter) proizvajalca Sontek, ki deluje na principu Dopplerjevega efekta (slika 6.3b). Po zagotovilih proizvajalca znaša natančnost meritev do ± 1 % merilnega območja. V našem primeru je bilo potrebno nastaviti merilno območje do 100 cm/s, tako znaša merilna negotovost meritev hitrosti ± 1 cm/s na modelu oziroma $\pm 0,021$ m/s v naravi.



Slika 6.3: Meritve na fizičnem modelu ribje steze (a) meritve gladin z ostnim merilom in (b) meritve hitrosti z ADV sondo.

Figure 6.3: Measurements on the physical model of the fishway (a) free surface elevation measurements and (b) velocity measurements with ADV probe.

Hitrosti so bile natančno izmerjene v 4 prečnih profilih v srednjem prekatu modela na razdaljah $x = 0,6, 1,2, 1,8$ in $2,3$ m od gorvodnega večjega prečnega rebra (slika 6.4). V vsakem prečnem profilu so bile hitrosti izmerjene v 24 vertikalah z $\Delta y = 0,088$ m na višinah $h = 0,05, 0,25, 0,45$ in $0,65$ m od dna.



Slika 6.4: Prečni profili v srednjem prekatu ribje steze, kjer so bile merjene hitrosti vode.

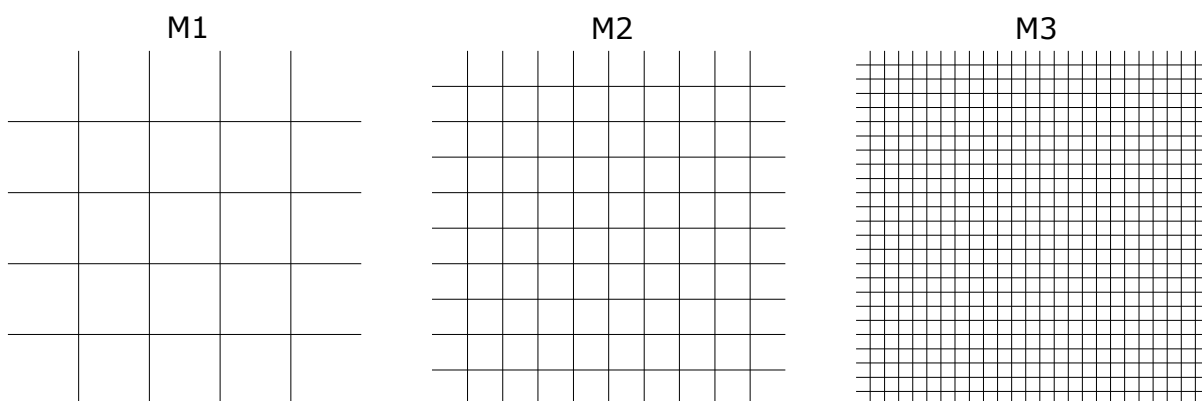
Figure 6.4: Cross sections in central pool of VSF where velocities were measured.

Rezultati meritev na fizičnem modelu bodo predstavljeni v nadaljevanju pri primerjavi rezultatov matematičnega modela.

7 MATEMATIČNI MODEL RIBJE STEZE

7.1 Opis modela in računski detajli

Obseg in geometrija matematičnega modela sta bila enaka obsegu in geometriji fizičnega modela (slika 6.1). Z namenom zagotovitve rezultatov, ki so neodvisni od velikosti numerične mreže, smo uporabili tri različno goste numerične mreže, ki so prikazane na sliki 7.1 in podrobneje opisane v preglednici 7.1.



Slika 7.1: Numerične mreže v srednjem prekatu ribje steze, uporabljene v izračunih. $M1 = 5,0 \times 5,0$ cm; $M2 = 2,5 \times 2,5$ cm; $M3 = 1,0 \times 1,0$ cm.

Figure 7.1: Numerical meshes in central pool of VSF, used for mathematical modelling. $M1 = 5.0 \times 5.0$ cm; $M2 = 2.5 \times 2.5$ cm; $M3 = 1.0 \times 1.0$ cm.

Vse numerične simulacije so bile izvedene za konstanten pretok $Q = 600$ l/s (za prototip), kar ustreza pretoku 14,77 l/s na pomanjšanem modelu. Predstavljeni rezultati se nanašajo na naravno merilo, zato smo rezultate meritev s fizičnega modela ustrezno preračunali. Izdelali smo tudi numerični model obravnavane ribje steze v laboratoriju, tj. v pomanjšanem merilu, katerega rezultati so potrdili, da je vpliv merila na rezultate zanemarljiv.

Za zagotovitev numerične stabilnosti in konvergence je bil nastavljen časovni korak računa $\Delta t = 0,1$ s. Za veliko večino testnih primerov smo dobili zelo dobre rezultate že pri veliko večjih časovnih korakih $\Delta t = 1,0 - 2,0$ s, vendar smo se zaradi konsistentnosti rezultatov odločili za uporabo enotnega časovnega koraka $\Delta t = 0,1$ s pri vseh izračunih. Znotraj enega časovnega koraka je bila nastavljena omejitev največjega števila iteracij med 50 do 500, odvisno od predpisane natančnosti rezultatov, velikosti numerične mreže in uporabljenega modela turbulence. Dovoljena relativna napaka znotraj časovnega koraka je bila nastavljena na 1 %. Čeprav se je v večini primerov tok ustalil po približno 1200 s, smo vse simulacije izvršili do končnega časa 3600 s.

7.2 Začetni in robni pogoji

Zgornji robni pogoj je predstavljal po prečnem prerezu enakomerno razporejen konstanten pretok $Q = 600$ l/s (enakomerna vzdolžna hitrost u ter prečna hitrost $v = 0$). Spodnji robni pogoj, ki je v programu podan kot pretočna krivulja, je bil določen iteracijsko in sicer tako, da je bila dosežena enaka globina vode v srednjih treh prekatih ribje steze.

Ob bočnih stenah kanala je bila predpisana prečna hitrost v enaka 0. Razporeditev vzdolžne hitrosti ob stenah je v primeru uporabe $k - \varepsilon$ modela turbulence opisal logaritemski zakon, v primeru modela s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti in modela Smagorinsky pa poenostavljen pogoj drseče vrednosti $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$.

7.3 Umerjanje modela

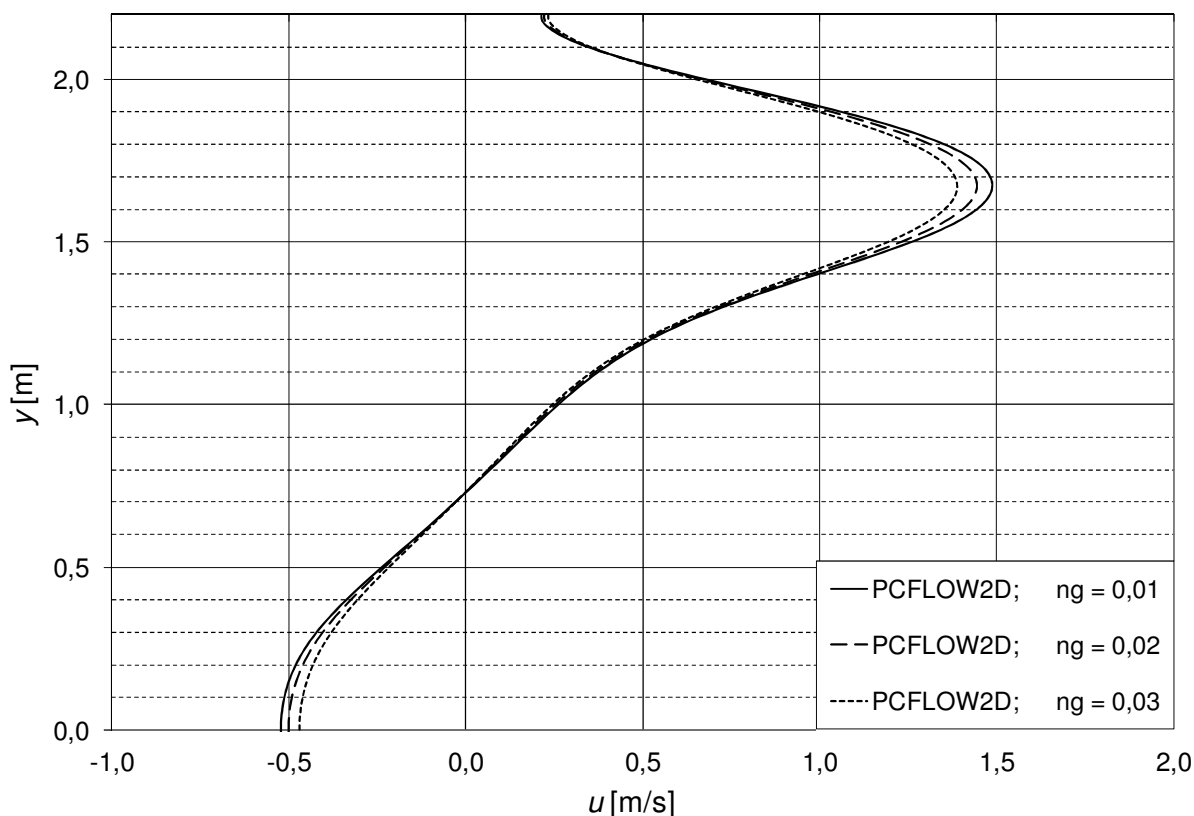
Za zagotovitev enakomernih tokovnih razmer v obravnavani ribji stezi z vertikalnimi režami je potrebno zagotoviti enake globine vode v opazovanih srednjih treh prekatih. To smo dosegli z variiranjem spodnjega robnega pogoja ob konstantnem pretoku $Q = 600$ l/s. Pri določanju spodnjega robnega pogoja je bil uporabljen model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t . Tako določena globina vode na spodnjem robu $h_{out} = 0,88$ m je bila v nadaljevanju uporabljena pri vseh simulacijah toka.

Manningov koeficient hrapavosti n_g za gladko plastiko, iz katere je bilo na fizičnem modelu narejeno dno ribje steze, je bil povzet iz literature in znaša $n_g = 0,010 \text{ sm}^{-1/3}$. Sicer pa je tok v takšni vrsti ribje steze precej neodvisen od hrapavosti podlage, kot je analizirano in opisano v naslednjem poglavju 7.4.1.

7.4 Rezultati in primerjava z meritvami na fizičnem modelu

7.4.1 Vpliv koeficienta hrapavosti

V prvi fazi raziskave smo raziskali vpliv koeficienta hrapavosti na rezultate. Primerjava rezultatov za primere z vrednostmi Manningovega koeficienta hrapavosti $n_g = 0,010$, $0,020$, in $0,030 \text{ sm}^{-1/3}$ je potrdila izsledke drugih raziskovalcev, da trenje ob dnu nima večjega vpliva na tokovno sliko pri tej vrsti toka (Cea et al., 2007; Chorda et al., 2010). Do manjših razlik pride v matici toka, kjer so maksimalne hitrosti v primeru $n_g = 0,020$ oz. $0,030 \text{ sm}^{-1/3}$ za 2 do 3 % oz. 4 do 7 % nižje od tistih pri $n_g = 0,010 \text{ sm}^{-1/3}$. Z ozirom na gladek material dna ribje steze (plastika) je bil izbran Manningov koeficient hrapavosti $n_g = 0,010 \text{ sm}^{-1/3}$.



Slika 7.2: Izračunana vzdolžna komponenta hitrosti u (m/s) v prečnem profilu $x = 2,3$ m za različne vrednosti n_g .
Figure 7.2: Calculated longitudinal velocity u (m/s) at cross section $x = 2.3$ m for various values of n_g .

7.4.2 Občutljivostna analiza vpliva velikosti numerične mreže

Opravili smo občutljivostno analizo rezultatov glede na velikost numerične mreže. Z izbiro gostejše numerične mreže dobimo seveda točnejše rezultate, vendar se s tem bistveno podaljšajo računski časi. Na izbiro velikosti numerične mreže močno vpliva numerična difuzija, ki jo v določenih točkah generira uporabljena numerična shema gorvodnih razlik (UPWIND), ki je del vgrajene hibridne sheme v programu PCFLOW2D. Shema gorvodnih razlik se uporabi v primerih, ko je Pecletovo število $P_e > 2$. Numerična difuzija je tem večja, čim bolj groba je uporabljena numerična mreža. Numerična difuzija ni fizikalna količina in predstavlja napako sheme prvega reda, ki pa se računsko obnaša kot difuzija. Predstavlja določen pribitek h koeficientu efektivne turbulentne viskoznosti, zato se gibalna količina ali kontaminant širi v večji meri kot je fizikalno realno. Približna ocena numerične difuzije je podana z empiričnim izrazom (Patankar, 1980):

$$v_{num} = \frac{V \Delta x \Delta y |\sin 2\alpha|}{4 \left(\Delta y |\sin \alpha|^3 + \Delta x |\cos \alpha|^3 \right)} \quad (7.1)$$

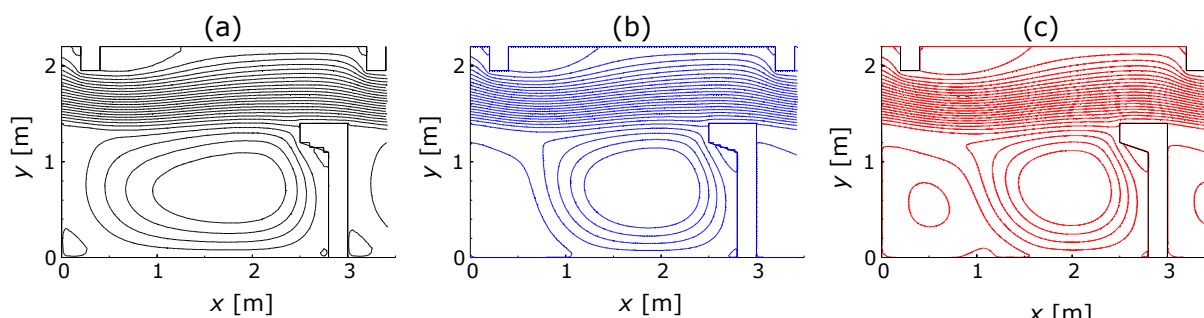
kjer V predstavlja velikost vektorja hitrosti v določeni točki, α predstavlja kot, ki ga vektor hitrosti oklepa z vzdolžno osjo x , Δx in Δy pa predstavljata velikost končnega volumna.

Preglednica 7.1: Numerične mreže, uporabljene v izračunih.

Table 7.1: Characteristics of numerical meshes used for mathematical modelling.

Oznaka mreže	Velikost celic ($\Delta x \times \Delta y$)	Število celic ($N_x \times N_y$)
M1	5,0 x 5,0 cm	620 x 46 = 28520
M2	2,5 x 2,5 cm	1238 x 90 = 111420
M3	1,0 x 1,0 cm (3. + ½ 2. in 4. prekata) 5,0 x 1,0 cm (ostalo)	1116 x 222 = 247752

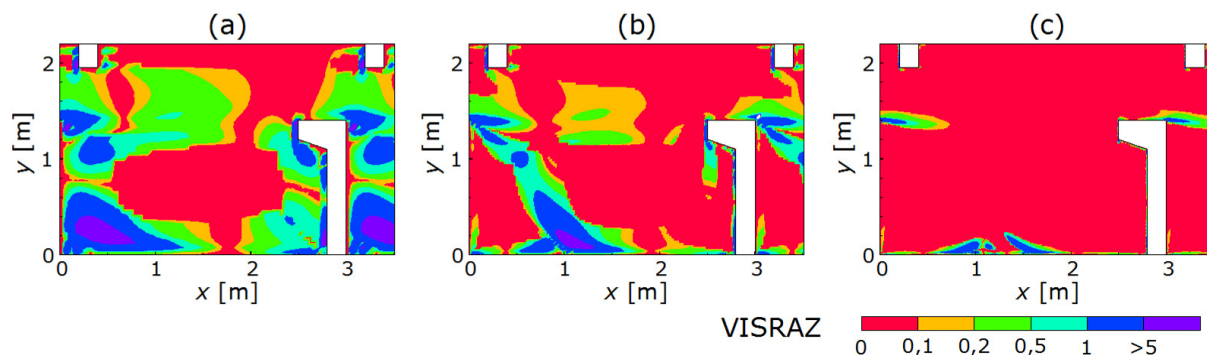
Natančnost rezultatov lahko izboljšamo z zgoščevanjem numerične mreže ali uporabo numeričnih shem višjega reda točnosti. Iz enačbe 7.1 izhaja, da ima izbira velikosti mreže velik vpliv na numerično difuzijo. Vpliv, ki ga ima numerična difuzija na rezultate, lahko ocenimo z vpeljavo razmerja med numerično difuzijo in koeficientom turbulentne viskoznosti ν_t . V programu PCFLOW2D je to razmerje označeno z VISRAZ. V primerih, ko je vrednost VISRAZ > 1 velja, da lahko vpliv numerične difuzije prevlada nad vplivom koeficienta turbulentne viskoznosti.



Slika 7.3: Tokovnice v srednjem prekatu ribje steze, izračunane s $k-\varepsilon$ modelom turbulence ob uporabi različnih velikosti numeričnih mrež. (a) mreža 5,0 x 5,0 cm, (b) mreža 2,5 x 2,5 cm, (c) mreža 1,0 x 1,0 cm.

Figure 7.3. Streamlines, calculated with the $k-\varepsilon$ turbulence model for various cell sizes. (a) 5.0 x 5.0 cm cells, (b) 2.5 x 2.5 cm cells, (c) 1.0 x 1.0 cm cells.

Na sliki 7.3 so prikazane tokovnice, izračunane s $k-\varepsilon$ modelom turbulence ob uporabi različnih numeričnih mrež. Največja razlika v tokovni sliki nastane v spodnjem levem delu prekata, kjer ob uporabi grobe mreže skoraj ne dobimo recirkulacije, z zgoščevanjem mreže pa se le-ta povečuje. Ta razlika v rezultatih je posledica numerične difuzije, ki je pri fini mreži bistveno manjša kot pri grobi numerični mreži. Na sliki 7.4 je prikazano razmerje med numerično difuzijo in turbulentno viskoznostjo VISRAZ za izračune s $k-\varepsilon$ modelom za vse tri uporabljene numerične mreže.



Slika 7.4: Razmerje numerične difuzije in turbulentne viskoznosti VISRAZ pri uporabi $k-\varepsilon$ modela turbulence. (a) mreža $5,0 \times 5,0$ cm, (b) mreža $2,5 \times 2,5$ cm, (c) mreža $1,0 \times 1,0$ cm.

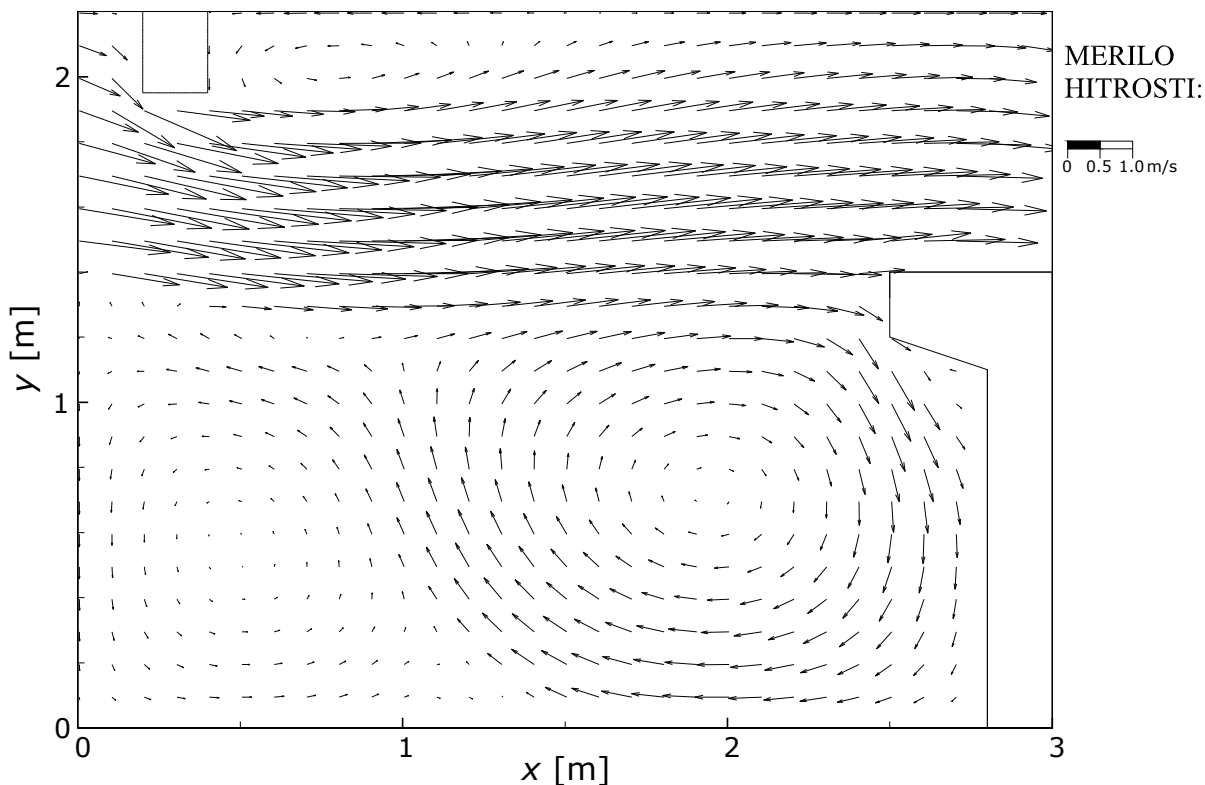
Figure 7.4: Values of the ratio between numerical diffusion and eddy viscosity coefficient ν_t for the $k-\varepsilon$ turbulence model (i.e. VISRAZ values). (a) 5.0×5.0 cm cells, (b) 2.5×2.5 cm cells, (c) 1.0×1.0 cm cells.

Iz slike 7.4 je razvidno, da je vpliv numerične difuzije zadovoljivo majhen šele ob uporabi najfinejše uporabljene numerične mreže M3. V primerih, ko je vpliv turbulentne viskoznosti pomemben (kot na primer pri simulaciji toka v ribji stezi), je vsekakor potrebno določiti vpliv numerične difuzije in ga zmanjšati na ustrezno raven.

7.4.3 Primerjava med uporabljenimi modeli turbulence

S programom PCFLOW2D smo opravili izračune s tremi različno natančnimi modeli turbulence. Njihova ustreznost ter prednosti in slabosti bodo predstavljene v nadaljevanju poglavja.

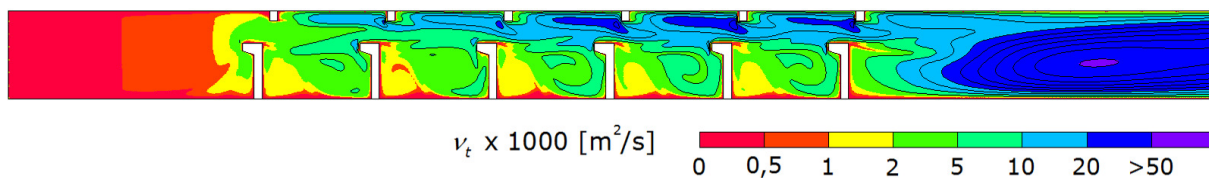
Pri dimenzioniranju ribjih stez je izrednega pomena natančno poznavanje hitrostnega polja, saj je od tega odvisno, ali bodo ribe sposobne migracije po stezi ali ne. Zato je še kako pomembna izbira takšnega modela turbulence, ki pravilno simulira tokovne razmere. Model turbulence, ki daje premajhne vrednosti turbulentne viskoznosti, napove prevelike hitrosti, v primeru prevelike turbulentne viskoznosti pa, obratno, premajhne. Poleg tega ima velik pomen na migracijo rib prav turbulentna kinetična energija in njena disipacija v ribji stezi. Tega se je pri dimenzioniranju ribjih stez potrebno zavedati in uporabljati dovolj natančne modele turbulence. Primer izračuna hitrostnega polja s $k-\varepsilon$ modelom turbulence je prikazan na sliki 7.5. Zaradi preglednosti vektorji hitrosti niso izrisani v vseh računskih točkah. Vidimo lahko, kako je matica toka z velikimi hitrostmi usmerjena v liniji med obema režama. V zgornjem delu prekata, tik za gorvodnim manjšim rebrom, se pojavi manjša zatišna cona s protitokom. V spodnjem delu prekata, med večjima rebroma, se pojavi večje recirkulacijsko območje z manjšimi hitrostmi. Tik za gorvodnim večjim rebrom se pojavi še eno v nasprotno smer vrteče se recirkulacijsko območje.



Slika 7.5: Hitrostno polje v srednjem prekatu ribje steze Blanca. $k - \varepsilon$ model turbulence; mreža 1×1 cm; $\Delta t = 0,1$ s.

Figure 7.5: Velocity field in the central pool of the VSF Blanca. $k - \varepsilon$ turbulence model; mesh 1×1 cm; $\Delta t = 0.1$ s.

Problem modelov turbulence, ki za izračun turbulentnih količin ne uporabljajo dodatnih transportnih enačb, kakršna sta uporabljena model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti in model Smagorinsky, je določitev koeficientov, ki nastopajo v enačbah. Teh vrednosti ne poznamo, zato lahko ob njihovi napačni izbiri dobimo zelo netočne rezultate. Ker tudi mi nismo poznali vrednosti ν_t pri modelu s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti ter koeficienta C_s pri modelu Smagorinsky, smo najprej izvršili izračune s $k - \varepsilon$ modelom. Na podlagi teh rezultatov smo nato "umerili" oba modela turbulence, ki ne vsebujeta dodatnih transportnih enačb. Rezultat $k - \varepsilon$ modela je bila prostorska razporeditev koeficienta turbulentne viskoznosti (slika 7.6).



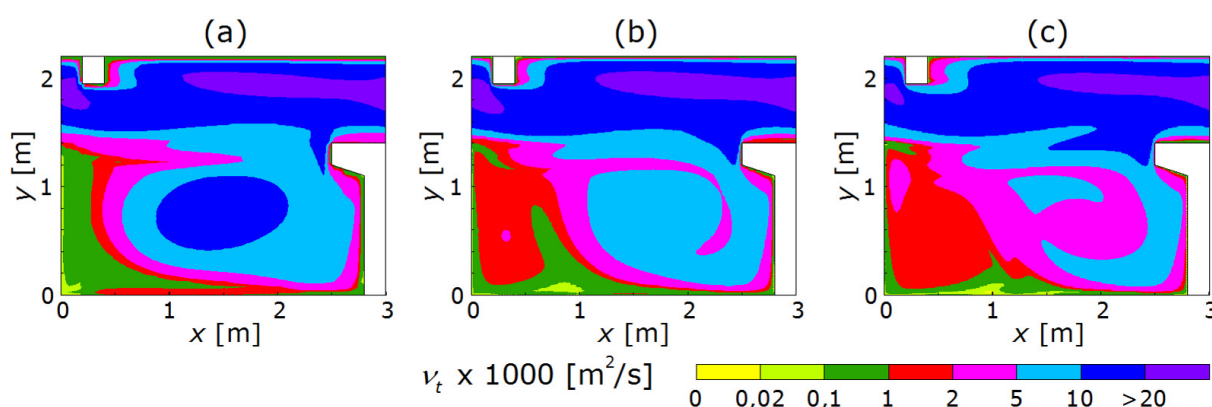
Slika 7.6: Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, izračunana s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. Mreža 1×1 cm; $\Delta t = 0,1$ s.

Figure 7.6: Values of eddy viscosity ν_t , multiplied by 1000, calculated with the $k - \varepsilon$ turbulence model. Mesh 1×1 cm; $\Delta t = 0.1$ s.

Izračunane vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t se precej spreminjajo po prostoru. V območju večjih hitrosti, tj. v območju vertikalnih rež, so te vrednosti približno 10 krat večje kot v

preostalem delu prekata (slika 7.6). Tako vidimo, kakšno poenostavitev pomeni uporaba modela turbulence s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti.

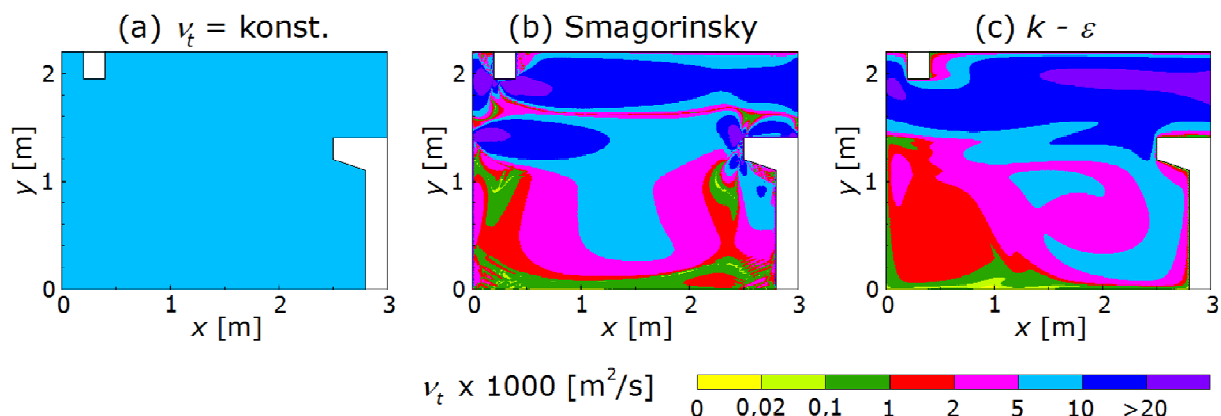
S simulacijami s $k - \varepsilon$ modelom turbulence pri različnih mrežah se je izkazalo tudi to, da so izračunane vrednosti ν_t odvisne od uporabljene velikosti numerične mreže. Bolj kot je numerična mreža gosta, manjša je povprečna vrednost $\bar{\nu}_t$ (slika 7.7), kar je ugotovil tudi Mellor (2004). Povprečna vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$ v srednjem prekату ribje steze je pri mreži 5,0 x 5,0 cm za 15 % večja od izračunane z mrežo 1,0 x 1,0 cm. Ta razlika se morda na prvi pogled zdi velika, vendar je v primerjavi s konstantnim modelom turbulentne viskoznosti malenkostna, saj navadno ne poznamo niti velikostnega razreda koeficienta ν_t , kaj šele njegove razporeditve po prostoru.



Slika 7.7: Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, izračunana s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. (a) mreža 5,0 x 5,0 cm; $\bar{\nu}_t = 8,613 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, (b) mreža 2,5 x 2,5 cm; $\bar{\nu}_t = 7,924 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, (c) mreža 1,0 x 1,0 cm; $\bar{\nu}_t = 7,324 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Figure 7.7: Values of eddy viscosity ν_t , multiplied by 1000, calculated with the $k - \varepsilon$ turbulence model. (a) 5.0 x 5.0 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 8.613 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, (b) 2.5 x 2.5 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 7.924 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, (c) 1.0 x 1.0 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 7.324 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

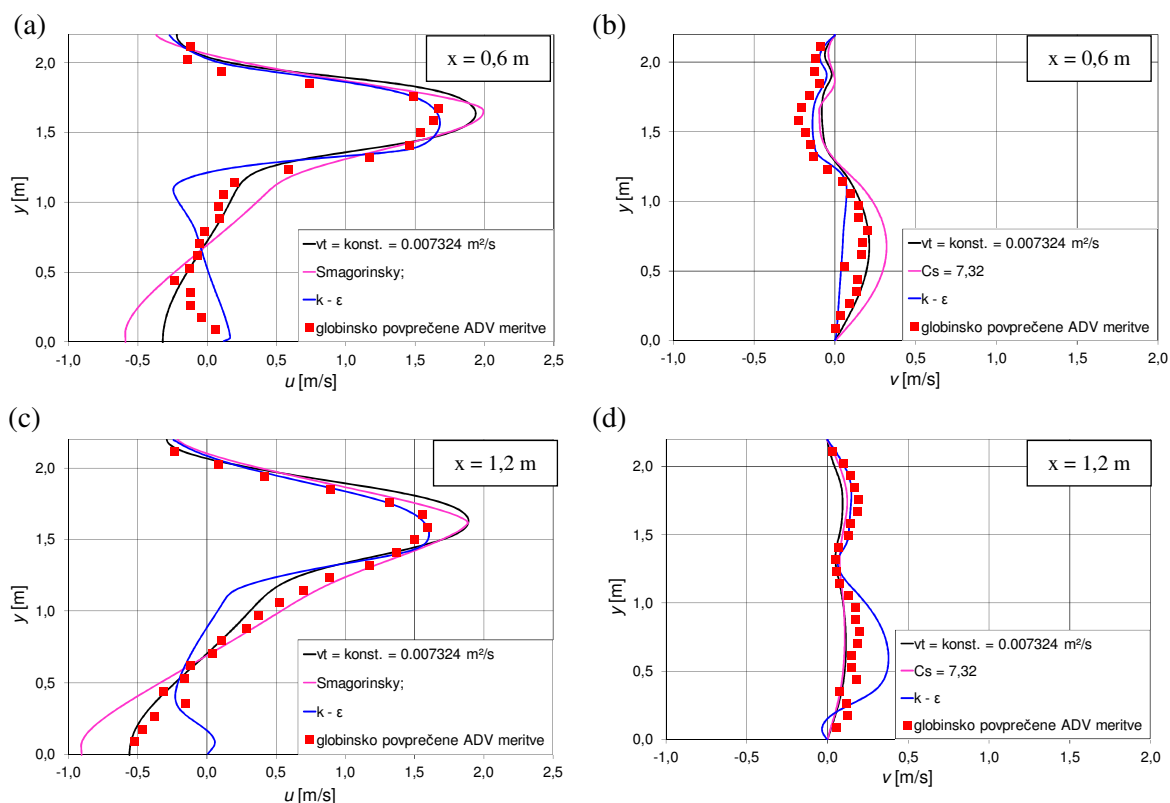
V naslednjem koraku smo izvršili simulacije s tako izračunanimi povprečnimi vrednostmi $\bar{\nu}_t$ z modelom s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti. Hkrati smo z iteriranjem iskali vrednost koeficienta C_s v modelu Smagorinsky, ki bi dal enake vrednosti $\bar{\nu}_t$ v opazovanem srednjem prekату. Tako dobljene vrednosti koeficienta C_s se močno razlikujejo od predlaganih za SGS model Smagorinsky ($0,10 < C_s < 0,24$). V našem primeru znaša za numerično mrežo 1 x 1 cm ustrezna vrednost $C_s = 7,32$. V nadaljevanju poglavja predstavljeni rezultati modela turbulence Smagorinsky se nanašajo na to vrednost C_s . Podrobnejša analiza modela Smagorinsky bo podana v poglavju 7.4.3.2. Na sliki 7.8 je prikazana razporeditev izračunanih ν_t pri različnih modelih turbulence in enaki povprečni vrednosti $\bar{\nu}_t$.

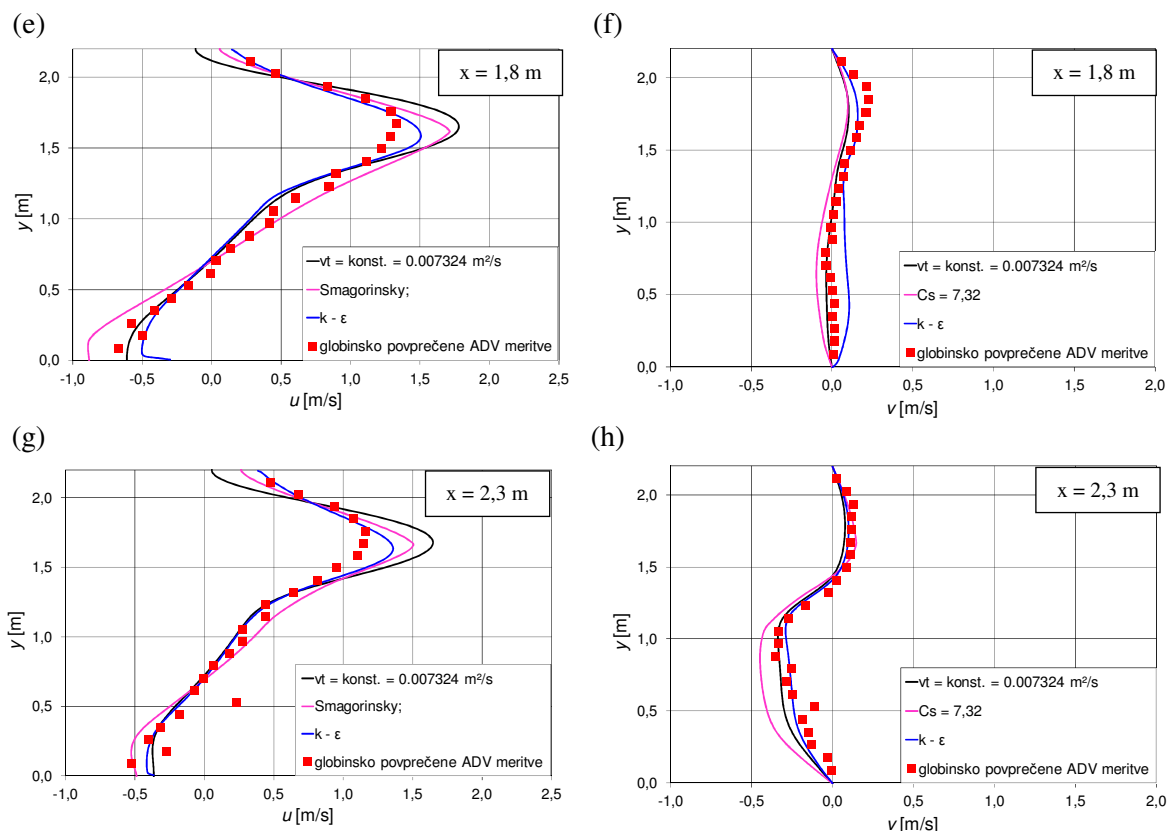


Slika 7.8: Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti v_t , pomnožena s 1000, za (a) model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti ($v_t = 0,007324 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) model Smagorinsky ($C_s = 7,32$) in (c) $k - \varepsilon$ model turbulence. V vseh primerih je uporabljena mreža $1 \times 1 \text{ cm}$.

Figure 7.8: Values of eddy viscosity coefficient v_t , multiplied by 1000, for (a) constant viscosity model ($v_t = 0.007324 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) Smagorinsky model ($C_s = 7.32$) and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases $1 \times 1 \text{ cm}$ mesh is used.

Vidimo, da je prostorska razporeditev koeficienta turbulentne viskoznosti pri modelu Smagorinsky dokaj podobna porazdelitvi, izračunani s $k - \varepsilon$ modelom. Oba modela izkazujejo izrazito večje vrednosti koeficienta v_t v zgornjem delu prekata, kjer se pojavljajo večje hitrosti, medtem ko so vrednosti v spodnjem delu prekata med obema večjima rebroma za velikostni razred manjše. Model Smagorinsky izkazuje v matici toka ozek pas z nižjimi vrednostmi v_t , kar ima za posledico večje maksimalne hitrosti na tem območju (slika 7.9).



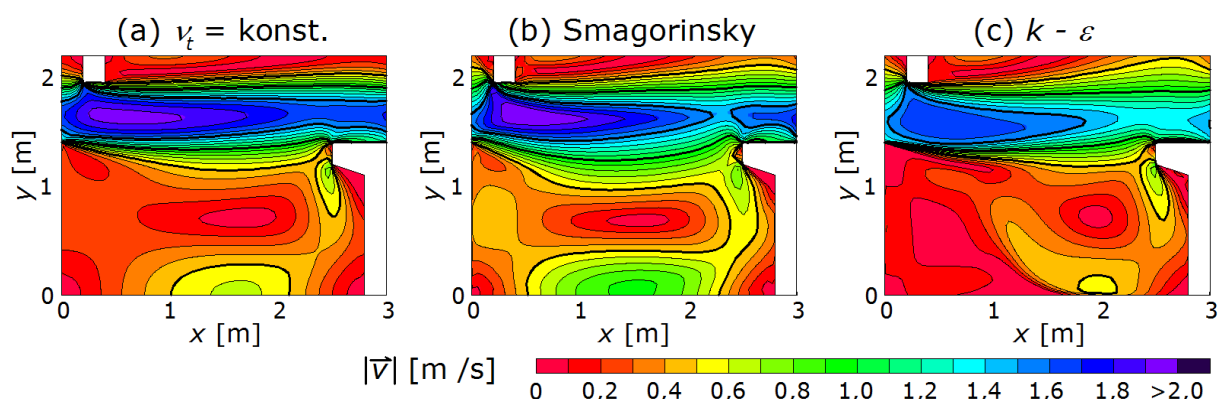


Slika 7.9: Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnih prerezih $x = 0,6, 1,2, 1,8$ in $2,3$ m. (a), (c), (e), (g) komponenta hitrosti u in (b), (d), (f), (h) komponenta hitrosti v .

Figure 7.9: Calculated and measured velocity components u and v at cross sections $x = 0.6, 1.2, 1.8$ and 2.3 m. (a), (c), (e), (g) velocity component u and (b), (d), (f), (h) velocity component v .

Slika 7.9 prikazuje izmerjene in izračunane komponente hitrosti u in v v štirih prečnih profilih, prikazanih na sliki 6.4. Rezultati izračunov se nanašajo na tri uporabljene modele turbulence pri najfinejši numerični mreži 1×1 cm. Detajlnejša primerjava rezultatov izračunov s PCFLOW2D za vse tri numerične mreže je podana v **prilogah C.1 do C.3**. Točkovne meritve hitrosti so bile na fizičnem modelu izvedene z ADV sondo na štirih globinah. Zaradi primerljivosti z izračunanimi globinsko povprečnimi hitrostmi so bili tudi rezultati točkovnih meritev hitrosti globinsko povprečeni. Na sliki 7.9 je vidno, da je ujemanje med meritvami na fizičnem modelu in rezultati izračunov s programom PCFLOW2D dobro. Analiza odstopanja rezultatov posameznih izračunov od meritev je pokazala, da so razlike najmanjše pri izračunih s $k - \epsilon$ modelom turbulence. Povprečna absolutna vrednost odstopanja s $k - \epsilon$ modelom turbulence izračunane vzdolžne komponente hitrosti u od meritev znaša $\Delta \bar{u} = 0,14$ m/s. Do nekoliko večjih odstopanj od meritev pride pri modelu s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti ($\Delta \bar{u} = 0,16$ m/s) in modelu turbulence Smagorinsky ($\Delta \bar{u} = 0,18$ m/s), ki oba simulirata prevelike maksimalne hitrosti v matici toka. Prav napoved pravih vrednosti maksimalnih hitrosti pa je ključnega pomena pri obravnavi toka v ribji stezi. Odstopanja pri uporabi modela Smagorinsky lahko pojasnimo s tem, da so spremembe hitrosti med sosednjimi računskimi celicami v matici toka majhne, model Smagorinsky pa predpostavlja, da je velikost v_t sorazmerna ravno tem spremembam. Posledica so izračunane majhne vrednosti v_t , kar vodi do prevelikih hitrosti. Pri uporabljenem modelu s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti so v tem delu toka vrednosti v_t ravno tako prenizke (glede na izračunane vrednosti s $k - \epsilon$ modelom, glej sliko 7.8),

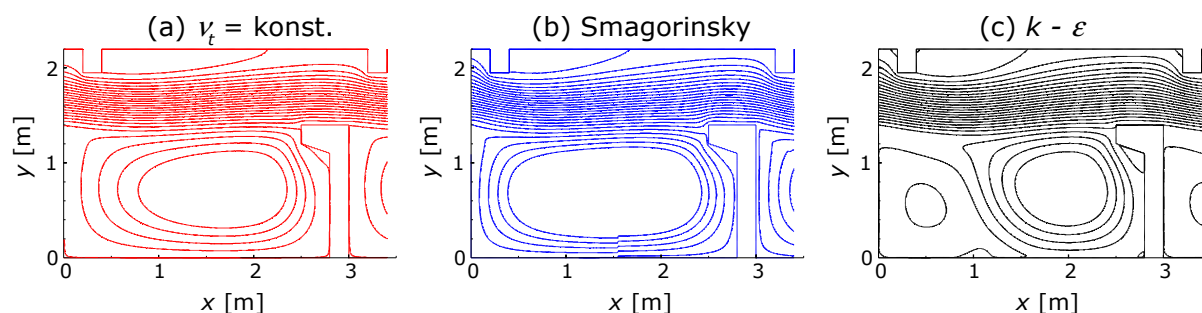
kar ima za posledico prevelike hitrosti. Natančna hitrostna slika za vseh 9 primerov (3 numerične mreže x 3 modeli turbulence) je prikazana v **prilogah C.4 do C.6**. Zaradi preglednosti so vektorji v prilogah izrisani v manj natančni (fini) mreži 10 x 10 cm, kot so dejansko izračunani. Za primere z najfinejšo numerično mrežo M3 to pomeni, da je izrisan vektor hitrosti v vsaki deseti točki tako po x , kot tudi po y smeri. Na sliki 7.10 so prikazane linije enakih hitrosti vode (izotahe) za najfinejšo numerično mrežo in vse tri modele turbulence.



Slika 7.10: Izračunane izotahe v srednjem prekatu ribje steze. (a) model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti ($\nu_t = 0,007324 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) model Smagorinsky ($C_s = 7,32$) in (c) $k - \epsilon$ model turbulence. V vseh primerih je uporabljena mreža 1 x 1 cm.

Figure 7.10: Calculated isovels in the middle pool of the fishway. (a) constant viscosity model ($\nu_t = 0.007324 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) Smagorinsky model ($C_s = 7.32$) and (c) $k - \epsilon$ model. In all cases 1 x 1 cm mesh is used.

Za boljšo predstavbo o tokovni sliki smo izdelali še primerjavo tokovnic za različne modele turbulence (slika 7.11). Medtem ko je simulacija zgornjega vrtinca med krajšima rebroma praktično enaka pri modelih Smagorinsky in $k - \epsilon$, pa model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti simulira precej večji vrtinec na tem mestu. Do večjih razlik med rezultati uporabljenih modelov turbulence pride pri simulaciji večjega vrtinca med večjima rebroma. Model s konstantno vrednostjo ν_t in model Smagorinsky simulirata zgolj en velik vrtinec, ki se v primeru modela Smagorinsky še bolj izrazito prilega robovom prekata. Model $k - \epsilon$ poleg večjega vrtinca na dolvodni strani prekata predvideva še nasprotni vrtinec na gorvodnem spodnjem delu prekata. Obstoj takšnega vrtinca je bil potrjen tudi z opazovanji na fizičnem modelu.



Slika 7.11: Tokovnice za (a) model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti ($\nu_t = 0,007234 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) model Smagorinsky ($C_s = 7,32$) in (c) $k - \epsilon$ model. V vseh primerih je uporabljena mreža 1 x 1 cm.

Figure 7.11: Streamlines for (a) constant viscosity model ($\nu_t = 0.007234 \text{ m}^2/\text{s}$), (b) Smagorinsky model ($C_s = 7.32$) and (c) $k - \epsilon$ model. In all cases 1 x 1 cm mesh is used.

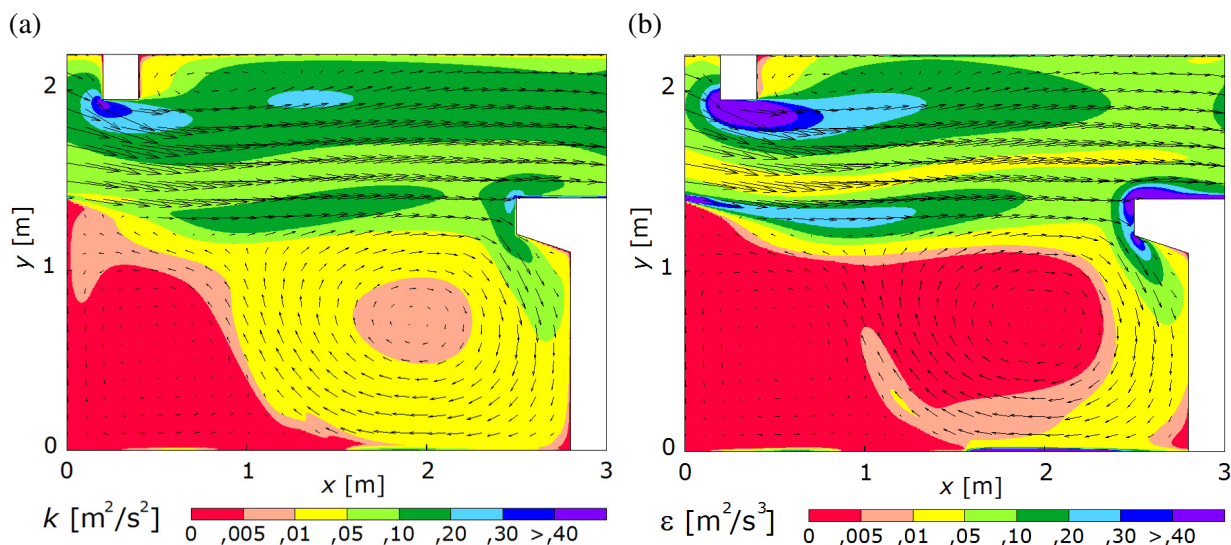
Vpliv numerične mreže ter vpliv izbranega modela turbulence je lepo viden v **prilogah C.4 do C.6**, kjer so izrisane tokovnice za vseh 9 primerov (3 mreže, 3 modeli turbulence).

Zaključimo lahko, da izračuni z vsemi tremi uporabljenimi modeli turbulence dajejo podobne rezultate hitrostnega polja, ki se ujemajo tudi z meritvami na fizičnem modelu. To je razumljivo, saj sta v obeh modelih turbulence brez transportnih enačb uporabljena natančno umerjena koeficienta ν_t in C_s . V praksi pa vrednosti teh koeficientov ne poznamo vnaprej, ob uporabi napačnih vrednosti pa lahko tako izračunani rezultati precej odstopajo od dejanskega stanja v naravi. Zato je v primerih, ko nimamo dovolj podatkov iz meritev, na katere bi lahko umerili enostavne modele turbulence brez dodatnih transportnih enačb, smiselno uporabiti kompleksnejši $k - \varepsilon$ model turbulence, ki brez posebnih prilagoditev dobro simulira turbulenco za široko paleto različnih vrst tokov (konstante v modelu so enake in se ne spreminjajo od primera do primera, kot je to v primeru enostavnih modelov turbulence brez dodatnih transportnih enačb za izračun turbulentnih količin) (Rodi, 1993). Čeprav izračuni s $k - \varepsilon$ modelom turbulence zahtevajo nekaj več računskega časa, ga je v primerih, kjer je vpliv turbulence pomemben, vsekakor smiselno uporabiti.

7.4.3.1 Uporaba $k - \varepsilon$ modela turbulence za določanje disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna E

Dejstvo, da smo z numeričnimi simulacijami dobili zelo dobro ujemanje hitrostnih polj z eksperimentom, samo po sebi še ne pomeni, da je točna tudi simulacija polja turbulence (Cea in sod., 2007). Za oceno biološke učinkovitosti ribje steze je pomembno dobro simuliranje turbulence (Katopodis, 2005; Silva in sod., 2010). Visoka stopnja turbulence moti ribe pri iskanju poti skozi ribjo stezo, poleg tega tudi povečuje njihovo utrujenost. Iz teh razlogov je pomembno, da uporabljamo ustrezen model turbulence, ki pravilno napove tako hitrostno kot tudi turbulentno polje (Bermudez in sod., 2010).

Od uporabljenih modelov turbulence zgolj $k - \varepsilon$ model turbulence računa stopnjo turbulentne kinetične energije na enoto mase k ter njene disipacije ε in je že s tega stališča edini primeren za obravnavo toka v ribjih stezah. Poleg tega so lahko izračuni izvedeni veliko hitreje, saj ni potrebno dolgotrajno umerjanje posameznih koeficientov, ker je njihova vrednost konstantna za večino vrst tokov. Na sliki 7.12 je prikazana izračunana prostorska razporeditev k in ε v srednjem prekatu.



Slika 7.12: (a) turbulentna kinetična energija na enoto mase k (m^2/s^2) in (b) disipacija turbulentne kinetične energije na enoto mase ε (m^2/s^3), izračunani s $k-\varepsilon$ modelom turbulence. Mreža 1×1 cm; $\Delta t = 0,1$ s.

Figure 7.12: (a) turbulent kinetic energy per unit mass k (m^2/s^2) and (b) energy dissipation rate per unit mass ε (m^2/s^3), calculated with the $k-\varepsilon$ turbulence model. Mesh 1×1 cm; $\Delta t = 0.1$ s.

Turbulentna kinetična energija k na enoto mase predstavlja kvadrat vrednosti pulzacij hitrosti v določeni točki (enačba 2.21), zato je neposredno merilo za intenzivnost turbulence. Vidimo, da so vrednosti turbulentne kinetične energije k (oziroma koren njene vrednosti) relativno majhne v primerjavi z maksimalnimi hitrostmi v prekatu (slika 7.10c). Nizke vrednosti k so v ribjih stezah zaželeni, saj se ribe navadno izogibajo območjem z visoko stopnjo turbulence (Liu, 2006). Še pomembnejši parameter je stopnja disipacije kinetične energije ε . Navadno se že v fazi projektiranja ribje steze oceni povprečno vrednost disipacije kinetične energije na enoto volumna \bar{E} po enačbi (Larinier, 2002):

$$\bar{E} = \frac{\rho g Q \Delta h}{V_p} \quad (7.2)$$

kjer je:

- \bar{E} povprečna vrednost disipacije kinetične energije na enoto volumna
- ρ gostota
- g gravitacijski pospešek
- Q pretok
- Δh višinska razlika med gladinama v sosednjih prekatih
- V_p volumen vode v prekatu ribje steze

Številni avtorji predlagajo, da ta vrednost za salmonidne vrste rib ne sme presegati 200 W/m^3 (Bell, 1990; Larinier, 2002; Chorda, 2010). V našem primeru znaša izračunana povprečna vrednost disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna $\bar{E} = 63 \text{ W/m}^3$ (po enačbi 7.2). Prostorski integral izračunanih vrednosti ε , ki smo ga iz vrednotili z numeričnim programom, smo pomnožili z

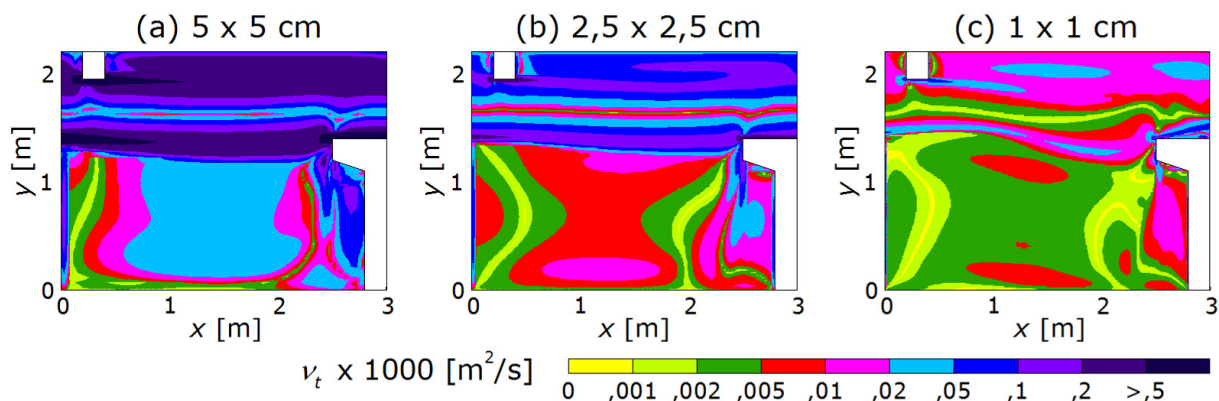
gostoto vode ρ in dobili povprečno vrednost disipacije turbulentne kinetične energije, ki je malenkost višja in znaša $\overline{E} = 77 \text{ W/m}^3$. Ujemanje rezultatov je v mejah, ki jih je v svojem članku objavil Chorda (2010). Bistveno višje vrednosti ε se pojavljajo zgolj na ozkem območju ob vertikalni reži. Na kar 94 % površine prekata je stopnja disipacije turbulentne kinetične energije $< 200 \text{ W/m}^3$, kar zagotavlja prehodnost ribje steze tudi bolj občutljivim ribjim vrstam.

7.4.3.2 Model turbulence Smagorinsky

Model turbulence Smagorinsky je bil primarno razvit za izračun turbulentnih napetosti v pod mrežnem merilu (Sub Grid Scale – SGS). Model predpostavlja, da turbulentne napetosti v pod mrežnem merilu sledijo gradient-difuzijskemu procesu, podobno kot pri molekularnem gibanju. Čeprav se model turbulence Smagorinsky uporablja v nekaterih komercialnih programih, kot na primer MIKE (DHI, 2012), CCHE2D (Jia in Wang, 2001) in POM (Mellor, 2004), za izračun celotnega spektra turbulence, nam za takšne primere ni znana analiza vpliva vrednosti koeficienta C_s . V navodilih za uporabo programske opreme so priporočene standardne ali nekoliko modificirane vrednosti $0,10 < C_s < 0,24$, ki se uporabljajo pri modeliranju turbulence na pod mrežnem merilu. Naši izračuni z modelom turbulence Smagorinsky so pokazali, da pri uporabi priporočenih vrednosti program izračuna hitrostno sliko, ki se zelo razlikuje od merjene. Zato je bila izvedena podrobnejša analiza vpliva vrednosti koeficienta C_s na rezultate modela.

Že Mellor (2004) je v svojem delu navedel, da se vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti z zgoščevanjem numerične mreže zmanjšuje. Pri izračunih s $k - \varepsilon$ modelom turbulence je bilo to potrjeno, saj smo pri simulaciji z numerično mrežo $5,0 \times 5,0 \text{ cm}$ dobili za 15 % večjo povprečno vrednost \overline{v}_t kot pri numerični mreži $1,0 \times 1,0 \text{ cm}$. Pri uporabi modela turbulence Smagorinsky so razlike med izračunanimi vrednostmi \overline{v}_t pri različno gostih numeričnih mrežah še bistveno večje. Da je vpliv velikosti numerične mreže pri modelu Smagorinsky izredno velik, je razvidno že iz enačbe 2.19. Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti je namreč kvadratno odvisna od dimenzije numerične celice. Za primere z vrednostjo koeficienta Smagorinsky $C_s = 0,17$ so na sliki 7.13 prikazane izračunane vrednosti v_t .

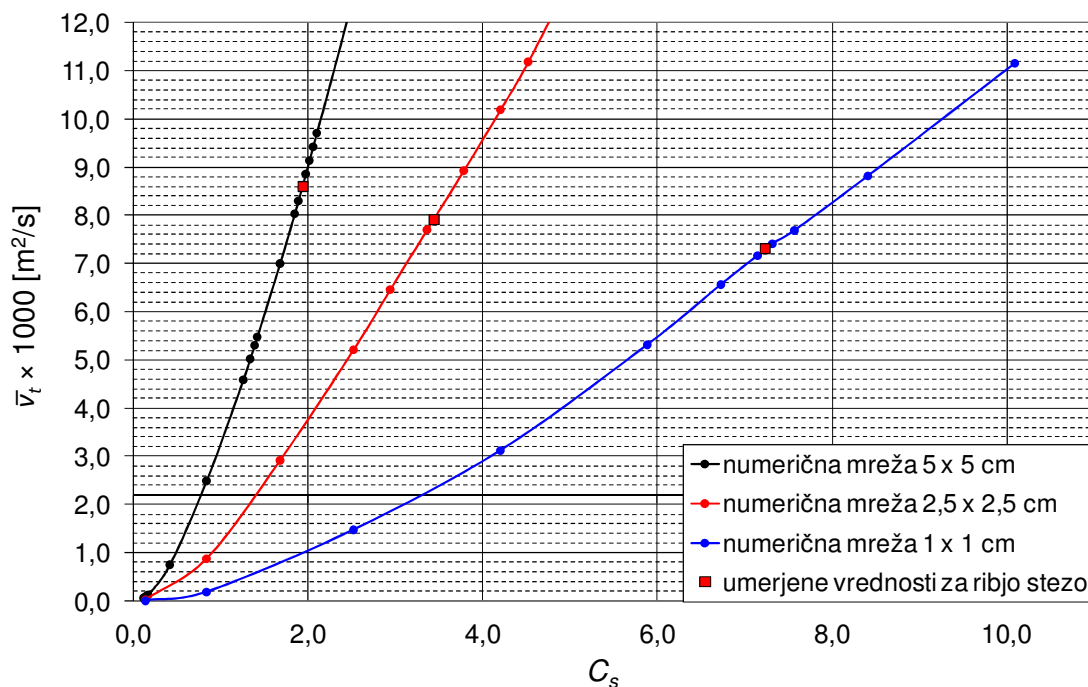
Povprečna vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti v srednjem prekatu je pri uporabljeni numerični mreži $5,0 \times 5,0 \text{ cm}$ za 3,6 krat večja kot pri mreži $2,5 \times 2,5 \text{ cm}$. Z mrežo $1,0 \times 1,0 \text{ cm}$ smo dobili za 16,0 krat manjšo povprečno vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti \overline{v}_t , kot pri mreži $5,0 \times 5,0 \text{ cm}$. Vidimo, da so razlike med \overline{v}_t pri posameznih numeričnih mrežah veliko večje kot pri $k - \varepsilon$ modelu. Še veliko bolj kot razlike v vrednostih \overline{v}_t med numeričnimi mrežami so pomembne razlike med modeloma turbulence Smagorinsky in $k - \varepsilon$. $k - \varepsilon$ model turbulence pri uporabljeni numerični mreži $1,0 \times 1,0 \text{ cm}$ daje kar 916 krat večjo povprečno vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti \overline{v}_t v srednjem prekatu ribje steze kot model Smagorinsky, ob uporabljeni priporočeni vrednosti koeficienta $C_s = 0,17$! Razlike v vrednostih \overline{v}_t pa pomembno vplivajo na tokovno sliko, saj so pri manjših vrednostih v_t izračunane hitrosti praviloma večje.



Slika 7.13: Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$, pomnožena s 1000, izračunana z modelom turbulence Smagorinsky ($C_s = 0,17$). (a) mreža 5,0 x 5,0 cm; $\bar{\nu}_t = 1,28 \cdot 10^{-4}$ m²/s, (b) mreža 2,5 x 2,5 cm; $\bar{\nu}_t = 0,36 \cdot 10^{-4}$ m²/s, (c) mreža 1,0 x 1,0 cm; $\bar{\nu}_t = 0,08 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

Figure 7.13: Values of eddy viscosity $\bar{\nu}_t$, multiplied by 1000, calculated with the Smagorinsky turbulence model ($C_s = 0,17$). (a) 5.0 x 5.0 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 1.28 \cdot 10^{-4}$ m²/s, (b) 2.5 x 2.5 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 0.36 \cdot 10^{-4}$ m²/s, (c) 1.0 x 1.0 cm mesh; $\bar{\nu}_t = 0.08 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

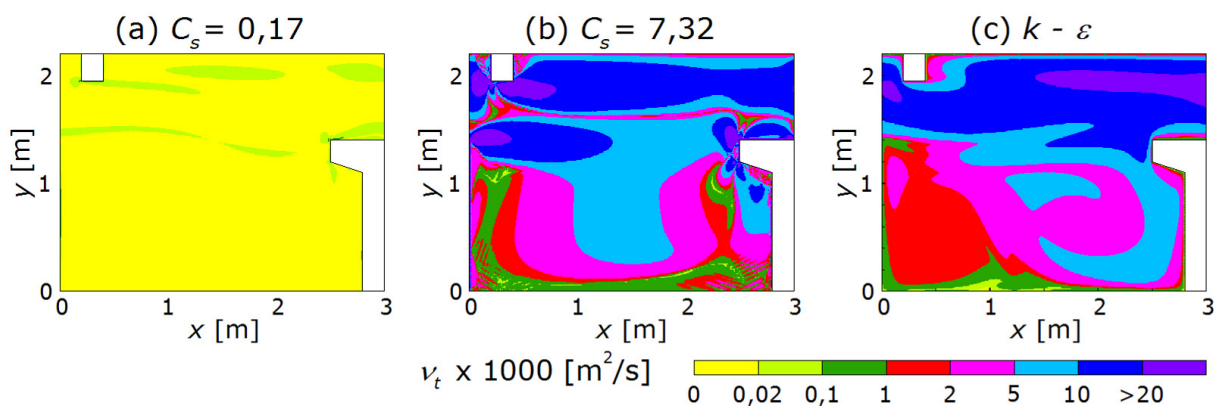
Zaradi tako velikih razlik je nujno umerjanje modela turbulence Smagorinsky oz. koeficienta C_s . Za primer obravnavane ribje steze smo za vse tri uporabljene numerične mreže poiskali takšno vrednost koeficienta C_s , da je povprečna vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$ v srednjem prekatu enaka izračunani s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. Izdelana je bila podrobna občutljivostna analiza koeficienta C_s na povprečno vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$ za uporabljene tri različno goste numerične mreže (slika 7.14).



Slika 7.14: Odvisnost izračunane povprečne vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$, pomnožena s 1000, od vrednosti koeficienta Smagorinsky C_s za tri različno goste numerične mreže.

Figure 7.14: The dependence of the calculated average value of eddy viscosity $\bar{\nu}_t$, multiplied by 1000, on the Smagorinsky coefficient C_s for three different numerical mesh sizes.

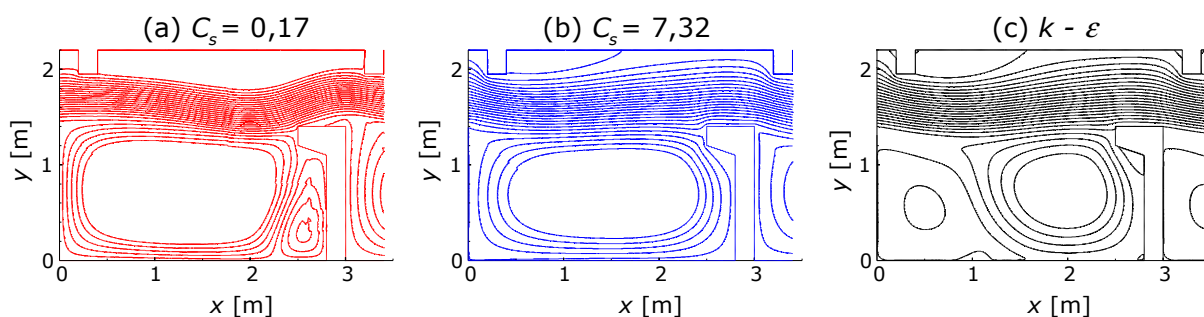
Vidimo, kako zelo odstopajo umerjene vrednosti koeficienta Smagorinsky od običajno priporočenih vrednosti $0,10 < C_s < 0,24$. Razlike so velike tudi med različnimi uporabljenimi numeričnimi mrežami. Tako je ustrezna vrednost C_s za mrežo $5,0 \times 5,0$ cm 1,94, za mrežo $2,5 \times 2,5$ cm znaša $C_s = 3,44$ in za mrežo $1,0 \times 1,0$ cm $C_s = 7,32$. Na sliki 7.15 je prikazana prostorska razporeditev koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t za (a) običajno vrednost $C_s = 0,17$, (b) za umerjeno vrednost $C_s = 7,32$ in (c) za najtočnejši $k - \varepsilon$ model turbulence pri uporabljeni najfinejši numerični mreži $1,0 \times 1,0$ cm.



Slika 7.15: Vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t , pomnožena s 1000, za (a) model Smagorinsky $C_s = 0,17$, (b) model Smagorinsky $C_s = 7,32$ in (c) $k - \varepsilon$ model. V vseh primerih je uporabljena numerična mreža 1×1 cm.

Figure 7.15: Values of eddy viscosity coefficient ν_t , multiplied by 1000, for (a) Smagorinsky model $C_s = 0.17$, (b) Smagorinsky model $C_s = 7.32$ and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases 1×1 cm numerical mesh is used.

Vidimo, da so razlike med rezultati, dobljenimi z modelom turbulence Smagorinsky pri uporabi običajne in umerjene vrednosti koeficienta C_s zelo velike. Te razlike privedejo do povsem drugačne tokovne slike, kar lahko vidimo na sliki 7.16. V primeru (a) z uporabljenjo običajno vrednostjo C_s praktično ni recirkulacijske cone med manjšima rebroma v zgornjem delu prekata.

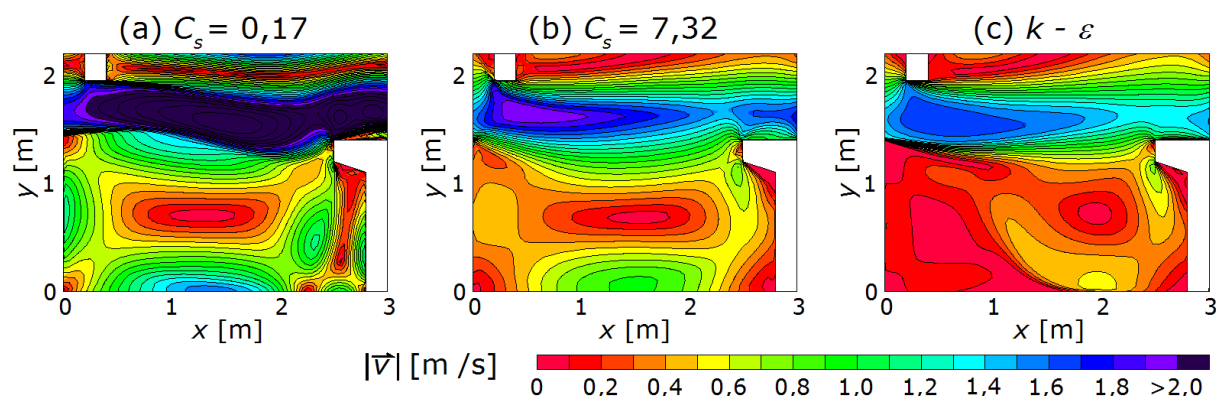


Slika 7.16: Tokovnice za (a) model Smagorinsky $C_s = 0,17$, (b) model Smagorinsky $C_s = 7,32$ in (c) $k - \varepsilon$ model. V vseh primerih je uporabljena numerična mreža 1×1 cm.

Figure 7.16: Streamlines for (a) Smagorinsky model $C_s = 0.17$, (b) Smagorinsky model $C_s = 7.32$ and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases 1×1 cm numerical mesh is used.

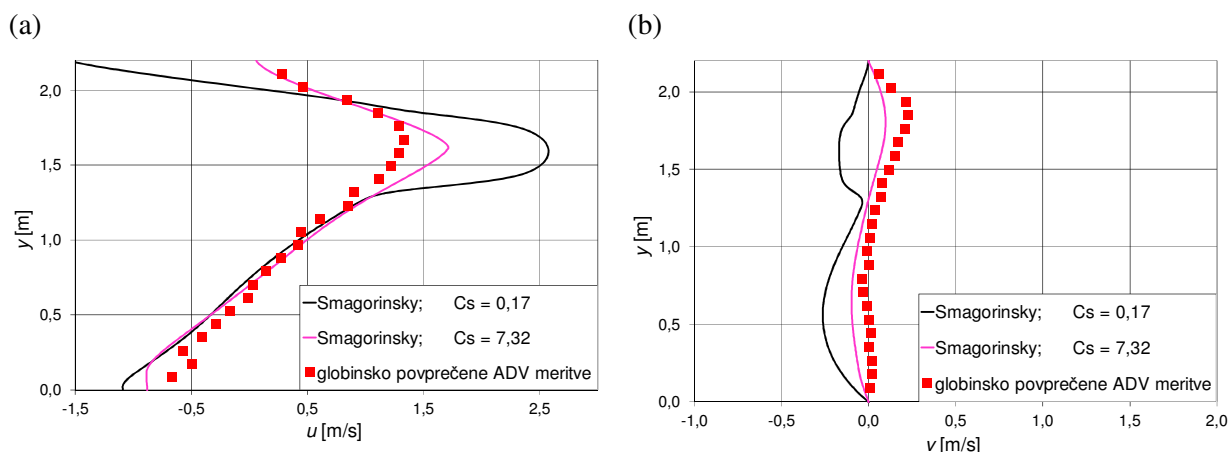
Najbolj nazorno so vidne razlike med uporabljenimi različnimi vrednostmi C_s pri prikazu izotah (slika 7.17). Zaradi premajhnih izračunanih vrednosti $\bar{\nu}_t$ je mešanje vode med glavnim curkom, ki teče med režama, in vodo v recirkulaciji med večjima rebroma, v primeru z uporabljenjo vrednostjo $C_s = 0,17$

močno podcenjeno. Posledično so maksimalne vzdolžne hitrosti v matici toka, izračunane z modelom turbulence Smagorinsky in uporabljeno običajno vrednostjo $C_s = 0,17$, občutno prevelike (slika 7.18).



Slika 7.17: Izotahe v srednjem prekatu ribje steze. (a) model Smagorinsky $C_s = 0,17$, (b) model Smagorinsky $C_s = 7,32$ in (c) $k - \varepsilon$ model. V vseh primerih je uporabljena numerična mreža 1×1 cm.

Figure 7.17: Isovels in the middle pool of the fishway. (a) Smagorinsky model $C_s = 0,17$, (b) Smagorinsky model $C_s = 7,32$ and (c) $k - \varepsilon$ model. In all cases 1×1 cm numerical mesh is used.



Slika 7.18: Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnem prerezu $x = 1,8$ m. (a) komponenta hitrosti u in (b) komponenta hitrosti v .

Figure 7.18: Calculated and measured velocity components u and v at cross section $x = 1,8$ m. (a) velocity component u and (b) velocity component v .

Pri nekritični uporabi modela turbulence Smagorinsky lahko naredimo velike napake. Vrednost koeficienta Smagorinsky C_s je namreč potrebno določiti z umerjanjem modela turbulence na neke točnejše podatke, bodisi meritve na prototipu ali pogostje na fizičnem modelu, bodisi na podatke iz preliminarnega izračuna s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. Temu zamudnemu umerjanju modela turbulence se z uporabo splošnega $k - \varepsilon$ modela izognemo. Zato je model turbulence Smagorinsky smiselno uporabljati takrat, ko z matematičnim modelom računamo veliko število variant, saj je izračun hitrejši kot s $k - \varepsilon$ modelom turbulence. Kadar nas zanimajo detajli turbulence je vsekakor smiselno uporabiti natančnejši $k - \varepsilon$ model turbulence.

7.4.4 Vpliv posameznih členov v dinamični enačbi

Tako kot za primer območja HE Brežice smo tudi za tok vode v ribji stezi izvednotili vpliv posameznih členov v dinamični enačbi (enačba 5.1 za x smer in enačba 5.23 za y smer). Pričakovali smo, da bo v tem primeru toka vpliv turbulentnih sil zaradi notranjega trenja v tekočini (6. in 7. člen) izrazitejši. To je bilo mogoče sklepati že iz primerjave rezultatov različnih uporabljenih modelov turbulence, ki so se med seboj precej razlikovali.

Podrobno analizo posameznih členov dinamičnih enačb smo opravili na primeru izračuna z najfinejšo uporabljeno numerično mrežo $M3$ (1×1 cm) ob uporabi $k - \varepsilon$ modela turbulence. Analizirane so bile razmere po 1 uri simulacije, ko se že vzpostavi stalni tok. Diskretizacija posameznih členov dinamičnih enačb v x in y smeri je podrobno opisana v poglavju 5.4.2, zato je tu ne navajamo. Razpored deležev posameznih členov v karakterističnem srednjem prekatu ribje steze je grafično prikazan v **Prilogah C.7** in **C.8**.

Najprej bo opisan delež posameznih členov v x smeri (približno v smeri toka), ki je v grafični obliki predstavljen v **prilogi C.7**.

Tok po modelu je po času 1 h že ustaljen, zato je bilo pričakovati, da bo delež 0. člena (enačba 5.24), ki predstavlja spremembo produkta hitrosti in globine vode v časovnem koraku, neznaten. Izračun je to potrdil, saj je v celotnem opazovanem prekatu delež 0. člena 0,0 %.

1. in 2. člen dinamične enačbe predstavljata vpliv vztrajnostnih sil. Njun vplivni delež je dokaj podoben; povprečni vplivni delež 1. člena znaša 17,6 %, 2. člena pa 18,5 %. V območju večjih hitrosti v zgornjem delu prekata ribje steze ($y > 1,4$ m) je delež 2. člena večji, vse do 50 %. 2. člen namreč upošteva spremembo produkta globine vode h in vzdolžne komponente hitrosti u v smeri x . Prav vzdolžna komponenta hitrosti pa se pred oviro v toku, ki jo predstavlja večje prečno rebro, zmanjša, torej je sprememba te hitrosti v x smeri velika.

Člena 3 in 4 opisujeta vpliv gravitacijskih sil. 3. člen, ki upošteva spremembo globine vode v vzdolžni smeri, ima povprečen vplivni delež 28,3 %. Zaradi relativno majhnih sprememb globine vode znotraj istega prekata v vzdolžni smeri, ki so velikostnega reda 1 mm, se v posameznih stolpcih numerične mreže lokalno pojavijo izredno majhne višinske razlike in posledično majhen vpliv 3. člena, kar botruje žagastemu vzorcu na vseh slikah v **prilogi C.7**. 4. člen upošteva spremembo kote dna kanala v vzdolžni smeri. Absolutna vrednost tega člena je v vseh celicah numerične mreže približno konstantna, malenkostna odstopanja so posledica različne globine vode v posameznih celicah, relativni vplivni delež v dinamični enačbi pa je največji na območju majhnih hitrosti za večjim prečnim rebrom, kjer je vpliv preostalih členov majhen.

5. člen v dinamični enačbi predstavlja vpliv sile zaradi upora. Kot je pokazala že v poglavju 7.4.1 opisana analiza vpliva koeficienta hrapavosti, je vpliv sil zaradi trenja ob dno pri obravnavanem toku v ribji stezi z vertikalnimi režami zanemarljivo majhen. Povprečni vplivni delež tega člena znaša zgolj

0,1 %. 5. člen ima največji vplivni delež v območju toka med obema vertikalnima režama ($1,4\text{ m} < y < 1,9\text{ m}$), kjer so hitrosti vodnega toka največje, pa še to le do 1,0 %. Velikost tega člena je namreč kvadratno odvisna od hitrosti.

V primerjavi s tokom na območju HE Brežice je vpliv turbulentnih sil zaradi notranjega trenja v tekočini, ki jih opisujeta 6. in 7. člen, v primeru obravnavanega toka v ribji stezi za nekaj velikostnih razredov večji. Povprečni vplivni delež 6. člena znaša kar 9,0 %, 7. člena pa 2,6 %. 6. in 7. člen imata največji vplivni delež ob in predvsem za ovirami v toku, tj. ob vertikalnih rebrih, ter na območjih, kjer prihaja do mešanja in interakcije osnovnega toka z veliko hitrostjo in recirkulacijskega vrtinca (pas okrog vrednosti $y = 1,4\text{ m}$). Velik vpliv 6. in 7. člena smo pričakovali, saj se rezultati izračunov hidrodinamike med uporabljenimi modeli turbulence precej razlikujejo, kar nakazuje na pomembnost pravilnega modeliranja turbulence.

Delež posameznih členov v y smeri (približno pravokotno na smer toka) je v grafični obliki predstavljen v **prilogi C.8**.

Za 0. člen, ki predstavlja časovno spremembo produkta hitrosti in globine vode, veljajo enake ugotovitve kot v *x* smeri. Tok po modelu je po času 1 h že ustaljen, zato je vplivni delež 0. člena 0,0 %.

1. in 2. člen dinamične enačbe predstavljata vpliv vztrajnostnih sil. Medtem ko je povprečni vplivni delež 1. člena dokaj podoben kot v smeri osi *x* in znaša 19,2 %, je povprečni vplivni delež 2. člena občutno večji, saj znaša kar 31,4 % (v smeri *x* zgolj 18,5 %). 2. člen upošteva spremembo produkta globine vode *h* in kvadrata prečne komponente hitrosti *v* v smeri *y*, kar daje največje relativne vrednosti na območju večjih hitrosti med obema vertikalnima rebroma.

Člena 3 in 4 opisujeta vpliv gravitacijskih sil. 3. člen, ki upošteva spremembo globine vode v prečni smeri ima največji povprečen vplivni delež, ki znaša 28,3 %. Največje vrednosti, celo prek 90 %, dosega med obema manjšima vertikalnima rebroma tik ob zgornji steni ribje steze ($y = 2,2\text{ m}$). 4. člen upošteva spremembo kote dna kanala v prečni smeri. Ker se kota dna ribje steze v prečni smeri ne spreminja, je absolutna vrednost tega člena v vseh celicah numerične mreže enaka 0, posledično je tudi relativni vplivni delež tega člena v dinamični enačbi na celotnem področju enak 0 %.

5. člen v dinamični enačbi predstavlja vpliv sile zaradi upora. Vpliv tega člena je, podobno kot v *x* smeri, zelo majhen (pravzaprav še manjši, saj so prečne komponente hitrosti *v* manjše od vzdolžnih *u*). Povprečni vplivni delež znaša 0,0 %, le na nekaj manjših območjih vrednosti vplivnega deleža presegajo 0,1 %.

Vpliv 6. in 7. člena, ki opisujeta vpliv turbulentnih sil zaradi notranjega trenja v tekočini, je podoben kot v *x* smeri. Povprečni vplivni delež 6. člena znaša 7,4 %, 7. člena pa 6,2 %. Medtem ko je vpliv 6. člena nekoliko manjši, pa je vpliv 7. člena večji kot v smeri *x*, saj podobno kot 2. člen upošteva

Podrobna analiza posameznih členov, ki nastopajo v dinamični enačbi, je potrdila našo hipotezo, da je v primeru močno turbulentnega toka, kakršen nastopi v obravnavani ribji stezi z vertikalnimi režami, vpliv turbulentnih sil zaradi notranjega trenja v tekočini (6. in 7. člen) razmeroma velik. Zato je pri numeričnem modeliranju takšnih tokov pomembno uporabiti takšen model turbulence, ki dovolj natančno zajame in opiše vpliv omenjenih turbulentnih sil.

Z namenom prikaza uporabnosti programa PCFLOW2D pri dimenzioniranju ribjih stez smo izvedli simulacije toka za šest različnih geometrij prekatov. Spreminjali smo položaj in dolžino manjšega rebra v prekatu. Raziskali smo različice z vertikalnim rebrom na položaju $x = 0,0$ m, $0,2$ m (originalna pozicija po projektu) in $0,4$ m ter dolžino rebra $d_y = 0,25$ m (originalna dolžina po projektu) in pri istih premikih še z drugo dolžino rebra, $d_y = 0,50$ m. Vse simulacije so bile izvedene ob enakih robnih pogojih ($Q = 600$ l/s, $h_{out} = 0,88$ m) in z enakimi numeričnimi parametri ($\Delta t = 0,1$ s, itd.), kot so opisani v začetku poglavja 7. Uporabljen je bil $k - \varepsilon$ model turbulence, ki daje največ numeričnih rezultatov, ki nas zanimajo. Osredotočili smo se na primerjavo hitrostnega polja in disipacijo turbulentne kinetične energije v srednjem prekatu, saj sta to izredno pomembna parametra, ki določata, ali ribe lahko potujejo navzgor po ribji stezi ali ne. Slika 7.19 prikazuje prostorsko razporeditev disipacije turbulentne kinetične energije na enoto mase za različne oblike in položaje manjšega rebra.

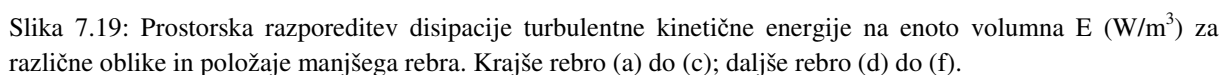


Figure 7.19: Energy dissipation rate per unit volume E (W/m^3) for various sizes and positions of small baffles. Short baffles (a) to (c); longer baffles (d) to (f).

Vse tri različice s krajšim rebrom dajejo podobne rezultate. Povprečna vrednost disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna \bar{E} v prekatu je najmanjša pri dolvodni poziciji in največja pri gorvodni poziciji krajšega rebra (preglednica 7.2). Do večjih razlik pride z vgradnjo daljšega rebra, saj se povprečna vrednost \bar{E} na vseh treh pozicijah bistveno poveča glede na različice s krajšim rebrom. Tudi pri različicah z daljšim rebrom je opaziti trend nižje povprečne vrednosti disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna \bar{E} s pomikanjem rebra dolvodno.

Preglednica 7.2: Primerjava maksimalnih hitrosti v_{\max} in stopnje disipacije turbulentne kinetične energije na enoto volumna E za različne velikosti in položaje manjšega rebra.

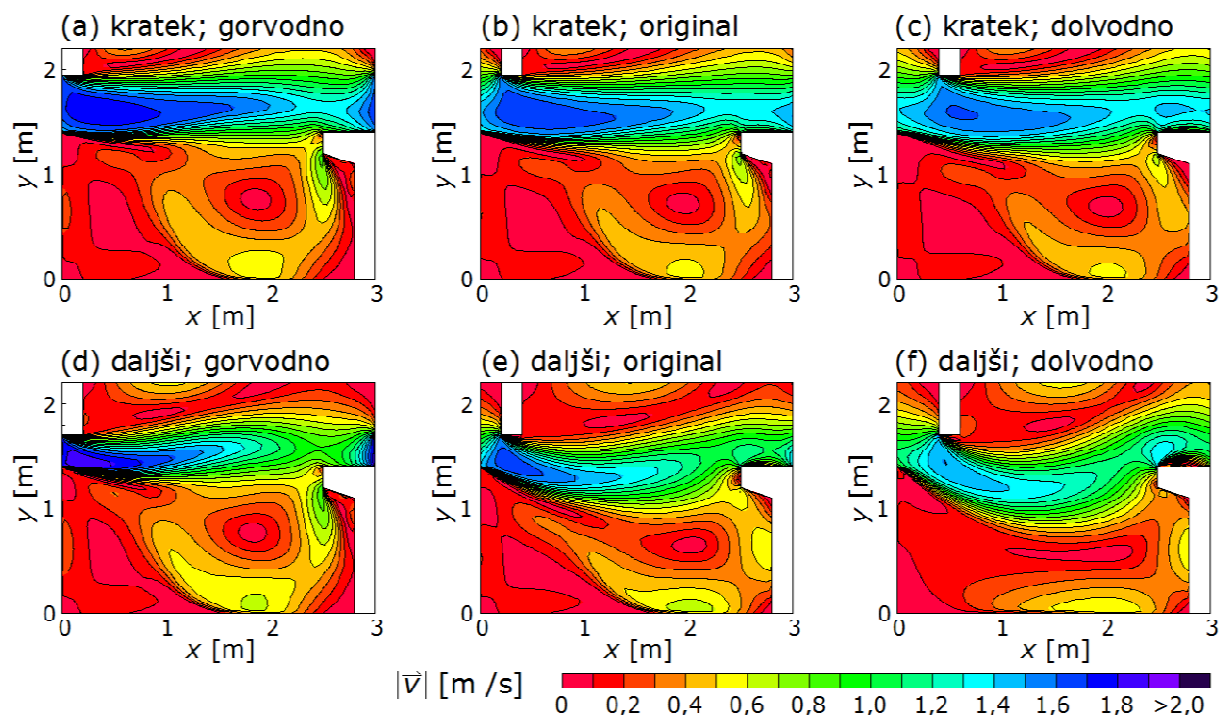
Table 7.2: Comparison of maximum velocities v_{\max} and energy dissipation rate per unit volume E for various sizes and positions of small baffles.

Delež površine prekata, kjer je $E < \text{od}$							
velikost in pozicija manjšega rebra	b_0 (m)	v_{\max} (m/s)	\bar{E} (W/m^3)	$E < 200$ (W/m^3)	$E < 150$ (W/m^3)	$E < 100$ (W/m^3)	$E < 50$ (W/m^3)
(a) kratek; gorvodno	0,550	1,79	82	92 %	87 %	78 %	58 %
(b) kratek; original	0,585	1,70	76	94 %	89 %	79 %	58 %
(c) kratek; dolvodno	0,680	1,62	69	96 %	91 %	82 %	59 %
(d) daljši; gorvodno	0,300	1,87	101	89 %	82 %	72 %	59 %
(e) daljši; original	0,361	1,67	93	90 %	84 %	71 %	53 %
(f) daljši; dolvodno	0,500	1,50	90	93 %	87 %	71 %	49 %

Od vseh preizkušenih različic ima različica (c) s krajšim rebrom na dolvodni poziciji najnižjo povprečno vrednost \bar{E} in je po tem kriteriju najugodnejša. V preglednici 7.2 so izračunani tudi deleži površine prekata, v katerih je stopnja disipacije turbulentne kinetične energije manjša od določene značilne vrednosti (200, 150, 100, 50 W/m^3). Stopnja disipacije turbulentne kinetične energije, ki je še primerna za prehod ribje steze, se razlikuje od ribje vrste do vrste. Na podlagi detajlnih rezultatov, ki jih lahko dobimo s programom PCFLOW2D, je možno z dokaj veliko mero gotovosti oceniti, ali bo prehod za določeno vrsto rib skozi ribjo stezo mogoč ali ne.

Drugi pomemben parameter, ki ga bomo obravnavali, je maksimalna hitrost in pa razporeditev hitrosti v prekatu. Maksimalne hitrosti za posamezne primere so prikazane v preglednici 7.2. Maksimalne hitrosti se praviloma zmanjšujejo z večanjem reže med prekati, tj. z oddaljevanjem manjšega rebra od večjega na spodnji strani prekata. Vseeno se najnižje maksimalne hitrosti pojavijo v primeru f), tj.

daljšega rebra na dolvodni poziciji, in znašajo 1,50 m/s. Vzrok leži v izračunanih večjih globinah vode v primerih z daljšimi rebri, zato se prečni profil poveča in so hitrosti lahko manjše.

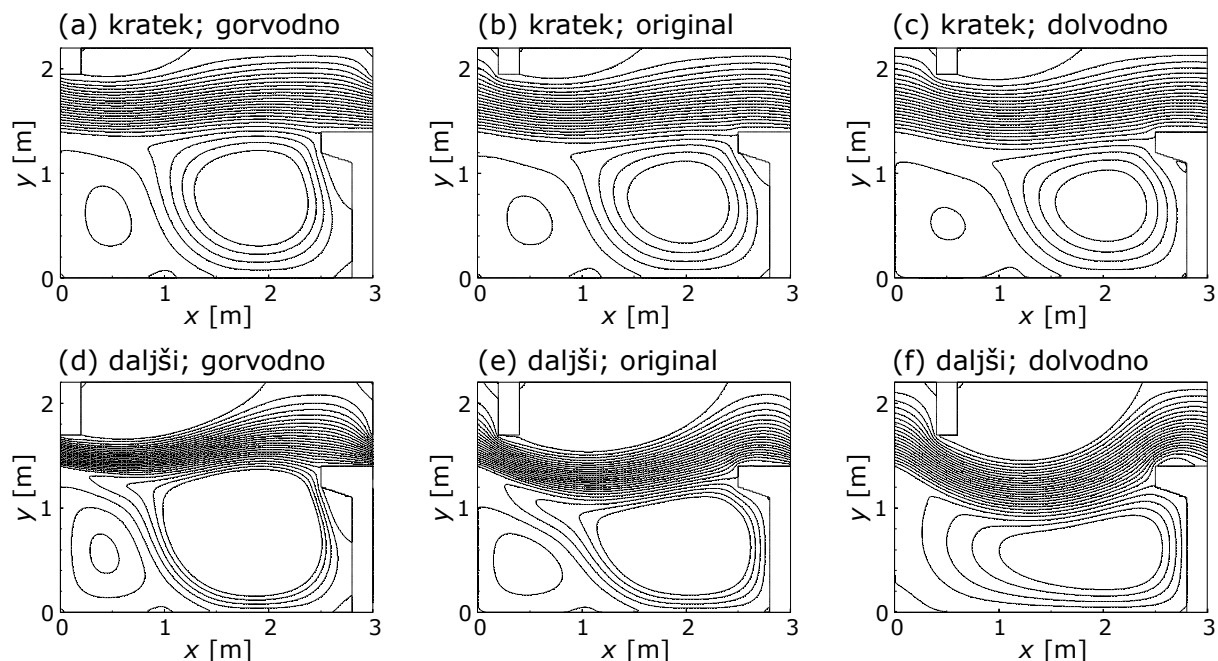


Slika 7.20: Izotahe v srednjem prekatu ribje steze za različne oblike in položaje manjšega rebra. Krajše rebro (a) do (c); daljše rebro (d) do (f). $k-\varepsilon$ model turbulence; numerična mreža 1×1 cm.

Figure 7.20: Isovels in the middle pool of the fishway for various sizes and positions of small baffles. Short baffles (a) to (c); longer baffles (d) to (f). $k-\varepsilon$ turbulence model; 1×1 cm numerical mesh.

Prostorska razporeditev hitrosti po prekatu je prikazana na sliki 7.20. Za obe velikosti manjšega rebra je lepo viden trend padanja hitrosti s pomikanjem manjšega rebra dolvodno. V vseh primerih pa se velike hitrosti pojavijo zgolj na ožjem območju reže, tako da imajo ribe dovolj možnosti za počitek v območju prekata z manjšimi hitrostmi, preden nadaljujejo svojo pot navzgor po ribji stezi.

Slika 7.21 prikazuje tokovnice za obravnavane različice manjšega rebra. Vidimo, da do bistvene razlike pride s povečanjem dolžine rebra. V primeru daljšega rebra nastane za njim občutno večji vrtinec kot v primeru krajšega rebra.



Slika 7.21: Tokovnice v srednjem prekatu ribje steze za različne oblike in položaje manjšega rebra. Krajše rebro (a) do (c); daljše rebro (d) do (f). $k - \varepsilon$ model turbulence; numerična mreža 1×1 cm.

Figure 7.21: Streamlines in the middle pool of the fishway for various sizes and positions of small baffles. Short baffles (a) to (c); longer baffles (d) to (f). $k - \varepsilon$ turbulence mode; 1×1 cm numerical mesh.

V tem poglavju so prikazane možnosti uporabe programa PCFLOW2D pri dimenzioniranju ribje steze. Za konkretno optimizacijo oz. dimenzioniranje bi bilo potrebno boljše poznavanje ribjih plavalnih sposobnosti ter navad, kar pa ni predmet te disertacije.

8 ZAKLJUČKI

Ob poplavah voda prestopi bregove rek ter se razlije na poplavne površine. V nalogi je podrobno opisano dogajanje na interakciji med tokom po strugi in po poplavnih površinah. Številni avtorji se s to problematiko ukvarjajo že desetletja, saj so modelne raziskave manjših območij pokazale, da je pravilno modeliranje dogajanja na tej interakciji izjemno pomembno, če želimo pravilno napovedati tokovne parametre. Na območju interakcije se pojavijo tokovi, ki so izrazito turbulentni. Prav matematično modeliranje turbulence pa je bistveni del te naloge.

Splošnemu pregledu in opisu enačb, ki opisujejo gibanje tekočine in so uporabljene v matematičnih modelih, sledi analiza toka v geometrijsko pravilnem pravokotnem kanalu s sestavljenim prerezom. Na tem enostavnem primeru so prikazani različni pristopi k modeliranju toka v rekah s poplavnimi področji. Med seboj smo primerjali rezultate izračunov z različnimi modeli turbulence, ki so vgrajeni v program PCFLOW2D ter rezultate izračunov s komercialnim programskim paketom MIKE (DHI, 2012), ki med drugim omogoča drugačen pristop k modeliranju toka v rekah s poplavnimi področji, saj se lahko tok vode v glavni strugi modelira z 1D modelom, tok na poplavnih površinah pa z 2D modelom.

Praktičen primer toka v rekah s poplavnimi področji je predstavljalo območje bodoče HE Brežice s poplavnimi področji, ki je bilo natančno modelirano na pomanjšanem fizičnem modelu v okviru projekta hibridnih hidravličnih modelov (Rodič in sod., 2010). Podatki, pridobljeni na tem modelu, so služili za natančno umerjanje matematičnega modela istega območja. Navadno je kalibracija matematičnih modelov izvedena na omejene podatke meritev iz narave. Ker pa so bile meritve iz narave opravljene le ob strugi, je bil potreben fizični model, ki je dal podatke tudi o razmerah na poplavnih področjih.

Z umerjenim matematičnim modelom območja HE Brežice je bila v prvi fazi izvedena analiza vpliva koeficienta hrapavosti in koeficienta turbulentne viskoznosti na tokovne razmere ter izmenjavo vode med glavno strugo in poplavnimi področji. Opravljena analiza vpliva koeficienta hrapavosti na posameznih območjih nazorno prikaže majhen vpliv spremembe koeficienta na območjih z majhnimi hitrostmi in obratno. Ker je vpliv spremembe vrednosti koeficienta hrapavosti na posameznem področju natančno ovrednoten, nam to omogoča hitrejšo in boljše umerjanje matematičnih modelov v prihodnje. Poleg tega nam daje večje zaupanje v rezultate matematičnih modelov za primere, kjer tako obsežnih podatkov iz meritev v naravi in na fizičnem modelu ni in se je pri umerjanju matematičnega modela potrebno zanesti na izkušnje, dobljene pri modeliranju podobnih pojavov.

Analiza vpliva koeficienta turbulentne viskoznosti je pokazala, da je za velika območja, kakršno je tudi obravnavano območje HE Brežice, vpliv koeficienta turbulentne viskoznosti neznatno, ob predpostavki, da je seveda uporabljena vrednost pravega velikostnega razreda. V našem primeru je šele 1000x večja vrednost od izbrane ($\nu_t = 1000 * \nu_t(\text{osnovni}) = 1000 * 0.01 \text{ m}^2/\text{s} = 10.0 \text{ m}^2/\text{s}$) povzročila opaznejši dvig gladin. Posledično za obravnavani primer ni potrebna uporaba

natančnejšega (in časovno bolj potratnega) modela turbulence, ki natančneje izračuna prostorsko razporeditev koeficienta efektivne turbulentne viskoznosti. To je potrdila tudi primerjava rezultatov različnih vgrajenih modelov turbulence v PCFLOW2D. Tudi podrobnejša analiza posameznih členov, ki nastopajo v dinamični enačbi, je potrdila izsledke opravljene analize.

Ujemanje rezultatov fizičnega in matematičnega modela je dobro. To je bilo pričakovati, saj je bil matematični model umerjen na rezultate fizičnega. V praksi navadno tako obsežnih in natančnih meritev naravnega pojava nimamo, zato se je potrebno zavedati rezultatske negotovosti takšnih izračunov. Posebno pozornost je potrebno nameniti pretokom, pripisanim visokovodnemu valu, za katerega so bile izmerjene pripadajoče kote gladin. Vendar se je potrebno zavedati, da še tako kvalitetne meritve iz narave in nanje ustrezno umerjen model (matematični ali fizični) pri veliki ekstrapolaciji ne zagotavljajo točnega rezultata, ampak ima le-ta lahko veliko modelno negotovost.

Za drugi primer praktične uporabe matematičnega modela PCFLOW2D smo izbrali simulacijo toka v ribji stezi Blanca. Narava toka v obravnavanem tipu ribje steze je izrazito turbulentna, zato je v tem primeru pravilno modeliranje turbulence bistvenega pomena. Na fizičnem modelu ribje steze v pomanjšanem merilu, zgrajenem prav za potrebe doktorske naloge, smo opravili številne meritve, ki so predstavljale osnovo za oceno točnosti posameznega modela turbulence. Na tem primeru so tudi detajlneje analizirani parametri vgrajenih modelov turbulence.

Na podlagi rezultatov uporabljenega $k - \varepsilon$ modela turbulence sta bila umerjena in analizirana druga dva uporabljena modela; model s konstantno vrednostjo turbulentne viskoznosti in model turbulence Smagorinsky. Pri natančnem pregledu literature smo opazili določeno nedoslednost pri zapisu enačbe, ki opisuje model turbulence Smagorinsky. Ta model, ki je bil pred kratkim vgrajen v matematični model PCFLOW2D, je bil zato ustrezno popravljen in natančno testiran. S tem namenom smo na podlagi serije simulacij opravili občutljivostno analizo empiričnega koeficienta C_s , ki je vgrajen v model. Izkazalo se je, da je vrednost koeficienta Smagorinskega C_s močno odvisna od obravnavanega primera, izrazito se spreminja že s pretokom in velikostjo uporabljene numerične mreže. Enako velja za koeficient turbulentne viskoznosti ν_t . Za primere, obravnavane v tej disertaciji, so s $k - \varepsilon$ modelom turbulence izračunane povprečne vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$ skupaj s pripadajočimi umerjenimi vrednostmi koeficienta Smagorinsky C_s prikazane v preglednici 8.1:

Preglednica 8.1: Primerjava povprečnih vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$, izračunanih s $k - \varepsilon$ modelom turbulence ter pripadajočih umerjenih vrednosti koeficienta Smagorinsky C_s za primere, obravnavane v tej disertaciji.

Table 8.1: Comparison of the average values of the eddy viscosity $\bar{\nu}_t$ calculated with the $k - \varepsilon$ turbulence model and related calibrated values of the Smagorinsky coefficient C_s for examples discussed in this thesis.

	Kanal enostavne oblike	Model Brežice	Ribja steza
Povprečna vrednost koeficienta turbulentne viskoznosti $\bar{\nu}_t$, pomnožena s 1000, izračunana s $k - \varepsilon$ modelom turbulence [m^2/s]	$0,21 < \bar{\nu}_t < 0,32$	$\bar{\nu}_t = 44$	$7,32 < \bar{\nu}_t < 8,61$
Koeficient Smagorinsky C_s	$1,42 < C_s < 1,91$	/	$1,94 < C_s < 7,32$

Vidimo lahko, kako zelo različne so lahko vnaprej navadno težko določljive vrednosti obeh koeficientov. Zato se pri izračunu izrazito turbulentnih tokov z obema modeloma turbulence brez dodatnih transportnih enačb pojavi problem ekstrapolacije vrednosti obeh koeficientov (ν_t in C_s), od uporabljenih pri umerjanju. Izkazalo se je, da lahko napačna ocena vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti ali pa napačna ocena vrednosti koeficienta C_s privede do netočnih rezultatov. Zato je ob uporabi teh dveh modelov nujno umerjanje modela turbulence na meritve, ki pa jih pogosto ni. Za oceno vrednosti koeficienta turbulentne viskoznosti ν_t (oziroma posredno koeficienta Smagorinskega C_s) se lahko uporabi vrednosti, izračunane s kompleksnejšim $k - \varepsilon$ modelom turbulence, ki je brez modifikacij vgrajenih koeficientov primeren za simulacije številnih vrst turbulentnih tokov (Rodi, 1993).

Model turbulence Smagorinsky je bil primarno razvit za izračun turbulentnih napetosti v pod mrežnem merilu (sub grid scale – SGS). Čeprav se model turbulence Smagorinsky uporablja v nekaterih komercialnih programih (MIKE, CCHE2D, POM) za izračun celotnega spektra turbulence, nam za takšne primere ni znana analiza vpliva vrednosti koeficienta C_s . Navadno so v navodilih za uporabo programa priporočene standardne vrednosti znotraj intervala $0,10 < C_s < 0,24$, ki se sicer uporabljajo pri modeliranju turbulence na pod mrežnem merilu. Naši izračuni z modelom turbulence Smagorinsky so pokazali, da pri uporabi priporočenih vrednosti dobimo rezultate, ki se zelo razlikujejo od merjenih. Zato je bila izvedena podrobnejša analiza vpliva vrednosti koeficienta C_s na rezultate modela.

Analizirali smo pojav numerične difuzije, ki je posledica uporabljene numerične sheme gorvodnih razlik (UPWIND), ki je del vgrajene hibridne sheme v programu PCFLOW2D. Numerična difuzija namreč predstavlja nek umeten pribitek k turbulentni viskoznosti, zato jo je potrebno čim bolj zmanjšati. To lahko dosežemo z zgoščevanjem numerične mreže ali pa z vgradnjo natančnejše numerične sheme višjega reda, kar pa je že del priporočil za nadaljnje delo.

Glavne prispevke k razvoju matematičnega modela PCFLOW2D lahko strnemo v naslednje točke:

- detajlna občutljivostna analiza vpliva posameznega parametra (koeficienta hrapavosti in koeficienta turbulentne viskoznosti) v modelu na potek gladin in razpored globinsko povprečnih hitrosti v toku,
- ocena ustreznosti uporabljenega modela turbulence v matematičnem programu PCFLOW2D na podlagi meritev hitrosti na fizičnem modelu,
- testiranje vgrajenega modela turbulence Smagorinsky ter občutljivostna analiza koeficienta C_s .

Dolgoročno bo tako dopolnjen matematični model PCFLOW2D lahko hitro in učinkovito orodje za simulacijo različnih poplavnih in drugih pojavov. Podrobna občutljivostna analiza posameznih parametrov modela in detajlna primerjava z rezultati, izmerjenimi na fizičnem modelu, nam v bodoče zagotavlja lažje umerjanje in večje zaupanje v dobljene rezultate matematičnih modelov.

9 NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO

Nadaljnji razvoj programa PCFLOW2D obsega vsaj tri področja in sicer:

- a) Izboljšanje numerične sheme,
- b) Dopolnitev $k - \varepsilon$ modela turbulence,
- c) Izdelava grafičnega okenskega vmesnika za vnos podatkov.

a) Izboljšanje numerične sheme

Izboljšanje numerične sheme bi pomenilo točnejše rezultate pri redkejši mreži, kar bi povečalo hitrost simulacij. Po drugi strani pa numerične sheme višjega reda porabijo več računskega časa. Pri numeričnih shemah višjega reda pogosto pride tudi do problemov s stabilnostjo računa, zato bi bilo potrebno tej problematiki posvetiti precej pozornosti. Izboljšani numerični shemi NONDIF in CONDIF je sicer v 3D program PCFLOW3D v sklopu izdelave doktorske disertacije vgradil že Četina (1992), vendar obe shemi prav zaradi omenjenih težav s stabilnostjo ter večjo porabo računskega časa še nista dovolj preizkušeni in je potrebno pri njunem vgrajevanju v program PCFLOW2D nadaljnje poglobljeno delo.

b) Dopolnitev $k - \varepsilon$ modela turbulence

Znano je, da izvorni člen P_k v $k - \varepsilon$ modelu turbulence v območju zastoynih točk izkazuje prevelike vrednosti produkcije turbulentne energije. Zato je Menter (1993) predlagal filter, ki to produkcijo omejuje navzgor. Problem modelov turbulence, ki temeljijo na Boussinesq-ovi predpostavki, je pojav negativnih Reynoldsovih napetosti na območjih z veliko turbulentno viskoznostjo, kar je fizično nemogoče. Zato je Durbin (1996) predlagal filter, ki zagotavlja, da so Reynoldsove napetosti vedno pozitivne. Vgradnja obeh filtrov v model PCFLOW2D bi lahko v nekaterih primerih izboljšala natančnost rezultatov vgrajenega modela turbulence $k - \varepsilon$, zato je omenjena izboljšava vsekakor smiselna.

c) Izdelava grafičnega okenskega vmesnika za vnos podatkov

Pomanjkljivost matematičnega programa PCFLOW2D je njegova raziskovalna naravnost in zato manjša prijaznost do uporabnika v praksi. Že z izdelavo relativno enostavnega grafičnega okenskega vmesnika za enostavnejši vnos najvažnejših geometrijskih in hidravličnih parametrov bi bila uporaba programa veliko priaznejša. Na ta način bi program lažje konkuriral podobnim komercialnim programom, katerih glavna konkurenčna prednost so prav dobri pred in post-procesorji za vnašanje podatkov in prikaz rezultatov.

LITERATURA

Bombač, M. 2005. Hidravlična optimizacija natočnega dela pretočnih hidroelektrarn. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Bombač): 101 str., 21 pril.

Bell, M. C. 1990. Fisheries handbook of engineering requirements and biological criteria. Portland, Oregon, U. S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division: 353 str.

Bermúdez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., Balairón, L. 2010. Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways. *Ecological Engineering*. 36, 10: 1355-1364.

Bousmar, D. 2002. Flow modelling in compound channels: Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains. Doktorska disertacija. Louvain-La-Neuve, Belgija, Université catholique de Louvain: 306 str.

Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vazquez-Cendon, M.E., Pena, E. 2007. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133, 2: 160-172.

Chorda, J., Maubourguet, M.M., Roux, H., George, J., Larinier, M., Tarrade, L., David, L. 2010. Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Research*. 48: 141-151.

Clay C.H. 1995. Design of fishways and other fish facilities. Ottawa, Dept. of Fisheries of Canada: 248 str.

Četina, M. 1988. Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Četina): 105 str., 71 pril.

Četina, M. 1992. Tridimenzionalni matematični baroklini model za izračun tokov v jezerih in morju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Četina): 127 str., 72 pril.

Četina, M. 1998. Dvodimenzijski program PCFLOW2D za račun toka s prosto gladino. Študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 82 str.

DHI, 2012a. MIKE 11, A modelling system for rivers and channels, User Guide. Denmark, Danish hydraulic institute (DHI): 544 str.

DHI, 2012b. MIKE 21 FLOW MODEL, Hydrodynamic Module, User Guide. Denmark, Danish hydraulic institute (DHI): 122 str.

DHI, 2012c. MIKE FLOOD, 1D-2D Modelling, User Manual. Denmark, Danish hydraulic institute (DHI): 160 str.

Durbin, P. 1996. On the $k - \epsilon$ stagnation point anomaly. International Journal of Heat and Fluid Flow. 17, 1: 89-90.

Enders, E.C., Boisclair, D., Roy, A.G. 2003. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 60, 9: 1149-1160.

Ervine, D.A., Willetts, B.B., Sellin, R.H.J., Lorena, M. 1993. Factors affecting conveyance in meandering compound flows. Journal of Hydraulic Engineering. 119, 12: 1383-1399.

Fang, L. 2011. A new dynamic formula for determining the coefficient of Smagorinsky model. Theoretical and Applied Mechanics Letters. 1, 3: 1-4 str.

Germano, M. 1992. Turbulence: The filtering approach. Journal of Fluid Mechanics. 238: 325-336.

Hamzić, R. 2012. Dopolnitev modela PCFLOW2D s $k-\epsilon$ modelom turbulence za nestalni tok. Diplomsko naloga, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Hamzić): 47 str.

HESS, d.o.o. 2010. Prehod za vodne organizma na HE Blanca.
<http://www.he-ss.si/pdf/kratek-opis.pdf> (Pridobljeno 12.2.2013)

Hughes S. A. 1993. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. World Scientific Publishing: 588 str.

Ikeda, S., Ohta, K., Hasegawa, H. 1994. Instability-induced horizontal vortices in shallow open channel flows with an inflexion point in skewed velocity profile. Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, 12, 2: 69-84.

Ikeda, S., Sano, T., Fukumoto, M., Kawamura, K. 2000. Organized horizontal vortices and lateral sediment transport in compound open channel flows. Proceedings of JSCE 656: 135-144.

ISO 1438:2008. Hydrometry - Open channel flow measurements using thin - plate weirs.

Jia, Y, Wang, S.S.Y., 2001. CCHE2D: Two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel flows over loose bed. NCCHE Technical Report, NCCHE-TR-2001-01. Mississippi, The University of Mississippi: 89 str.
<http://www.ncche.olemiss.edu/sites/default/files/files/docs/cche2d/techmanual.pdf>

(Pridobljeno 5.8.2013)

Jones, W.P., Launder, B.E. 1972. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 15, 2: 301-314.

Josipovič, Z., Ciuha, D., 2009. Prehod za vodne organizme HE Blanca. Projekt izvedenih del. Ljubljana, IBE, d.d.

Katopodis, C. 2005. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. *IAHR Journal of Hydraulic Research*. 43, 5: 451–467.

Keller, R.J., Rodi, W. 1988. Prediction of flow characteristics in main channel flood-plain flows. *Journal of Hydraulic Research*. 26, 4: 425–441.

Khatua, K.K., Patra, K.C. 2008. Interaction of flow in meandering and straight channel with floodplains. *Proceedings of International Conference Hydro-Vision, California, USA*: 11 str.

Khatua, K.K., Patra, K.C. 2009. Flow distribution in meandering compound channel flow. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 15, 3: 11-26.

Kim, T.K. 2001. A modified Smagorinsky subgrid scale model for the large eddy simulation of turbulent flow. *Doktorska disertacija*. Davis, Univeristy of California: 78 str.
<http://arxiv.org/abs/math/0209377> (Pridobljeno 15.11.2012)

Knight, D.W. 2013. River hydraulics – a view from midstream. *Journal of Hydraulic Research*. 51, 1: 2-18.

Knight, D.W., Aya, S., Ikeda, S., Nezu, I., Shiono, K. 2009. Flow structure. Poglavlje v monografiji *Flow and sediment transport in compound channels* (Ikeda, S., McEvan, I.K.). IAHR.

Knight, D.W., Demetriou, J.D. 1983. Flood plain and main channel flow interaction. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*. 109, 8: 1073-1092.

Knight, D.W., Demetriou, J.D., Hamed, M.E. 1983. Hydraulic analysis of channels with flood plains. *International conference on the Hydraulic Aspects of Floods & Flood Control, London, England*: 129-144.

Knight, D.W., Hamed, M.E. 1984. Boundary shear in symmetrical compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 110, 10: 1412-1430.

Kobus, H. (ur.). 1980. Hydraulic modelling. Hamburg idr., Verlag Paul Parey, Pitman: 323 str.

Lambert, M.F., Sellin, R.H.J. 1996. Velocity distribution in a large-scale model of a doubly meandering compound channel. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water, Maritime and Energy Division*. 118: 10-20.

Larinier, M. 2002. Pool fishways, pre-barrages and natural bypass channels. V: Larinier, M. (ur.), Travade, F. (ur.), Porcher, J. P. (ur.). *Fishways: Biological basis, design criteria and monitoring*. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*: str. 54-82.

Lilly, D.K. 1966. On the application of the eddy viscosity concept in the inertial sub-range of turbulence. NCAR, Manuscript 123, Boulder, Colorado.

Liu, M., Rajaratnam, N., Zhu, D.Z. 2006. Mean flow and turbulence structure in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132, 8: 765-777.

Mellor, G.L. 2004. User guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University: 56 str.

<http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/FTPbackup/usersguide0604.pdf>

(Pridobljeno 27.2.2013)

Menter, F.R. 1993. Zonal two-equation $k - \omega$ turbulence models for aerodynamic flows. AIAA paper 93-2906. 24th Fluid Dynamics Conf. Orlando, Florida: 21 str.

Nezu, I., Onitsuka, K., Iketani, K. 1999. Coherent horizontal vortices in compound open channel flows. V: Singh, V.P. (ur.), Seo I.W. (ur.), Sonu, J.H. (ur.). *Hydraulic modelling*. Water Resources Publications, Colorado: 17-32.

Patankar, S.V. 1980. Numerical heat transfer and fluid flow. New York, McGraw-Hill Book Company: 197 str.

Patra, K.C., Kar, S.K. 2000. Flow Interaction of meandering river with floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 126, 8: 593-604.

Pavlović, R. 1982. Proračun transporta toplote i materije u rekama uz primenu matematskog modela sa jednačinama osrednjenim po dubini toka. *Godišnjak Vode Vojvodine*.

Pena, L., Cea, L., Puertas, J. 2004. Turbulent flow: An experimental analysis in vertical slot fishways. IAHR, 5th International Symposium on Ecohydraulics, Madrid, Spain: 881-888.

Powers, P., Orsborn, J. 1984. New concepts in fish ladder design: Analysis of barriers to upstream fish migration. Volume IV of IV: Investigation of the physical and biological conditions affecting fish passage success at culverts and waterfalls. Final Rep. 1982–1984, BPA Rep. DOE/BP-36523-1 Project No. 198201400, Bonneville Power Administration.

Puertas, J., Pena, L., Teijeiro, T. 2004. Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130, 1: 10–23.

Rajaratnam, N. in Ahmadi, R. 1979. Interaction between main channel and flood plain flows. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* 105, HY5: 573-588.

Rajaratnam, N. in Ahmadi, R. 1981. Hydraulics of channels with flood-plains. *Journal of Hydraulic Research*. 19, 1: 43-60.

Rajaratnam, N., Van der Vinne, G., Katopodis, C. 1986. Hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*. 112, 10: 909-927.

Rak, G. 2013. Hidravlična analiza vpliva rabe prostora na poplavnih območjih na potovanje poplavnih valov. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba G. Rak): 130 str., 44 pril.

Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F. 2011. Uporaba hibridnega hidravličnega modeliranja pri načrtovanju bodoče HE Brežice. 22. Mišičev vodarski dan: 193-201.

Rastogi, A.K., Rodi, W. 1978. Predictions of heat and mass transfer in open channels. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE* HY3: 397-420.

Rodi, W. 1993. Turbulence models and their application in hydraulics – A state-of-the-art review. Karlsruhe, Institut für Hydromechanik, University of Karlsruhe: 104 str.

Rodič, P., Novak, G., Vošnjak, S., Steinman, F., Rak, G., Šantl, S., Mueller, M. 2010. Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice: Distorzirani fizični model območja bazena HE Brežice in Hidrodinamični matematični model območja bazena HE Brežice: vmesno poročilo – analiza sedanjega stanja. Ljubljana, Hidroinštitut; Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem; IBE: 72 str., 33 pril.

Rogallo, R.S., Moin, P. 1984. Numerical simulation of turbulent flows. *Annual review of fluid mechanics*. 16: 99-137.

Sanjou, M., Nezu, I. 2009. Turbulence structure and coherent motion in meandering compound open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research*. 47, 5: 598-610.

Sellin, R.H.J. 1964. A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. *La Houille Blanche*. 7: 793-801.

Sellin, R.H.J., Irvine, D.A., Willetts, B.B. 1993. Behavior of meandering two stage channels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water, Maritime and Energy*. 101, 2: 99-111.

Shiono, K., Knight, D.W. 1991. Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*. 222: 617-646.

Shiono, K., Muto, Y. 1998. Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 376: 221-261
doi:10.1017/S0022112098002869

Silva, A.T., Santos, J.M., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N., Katopodis, C. 2010. Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei* Steindachner 1865) in an experimental pool-type fishway. *River Research and Applications*. 27, 3: 360-373.

Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review* 91, 3: 99-164.

Sodja, J. 2007. Turbulence models in CFD. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko: 18 str.
<http://www-f1.ijs.si/~rudi/sola/Turbulence-models-in-CFD.pdf> (Pridobljeno 22.9.2010)

Strupczewski, W. G., Szymkiewicz, R. 1996. Analysis of paradoxes arising from the Chezy formula with constant roughness. I. Depth-discharge curve. *Hydrological Sciences Journal*. 41, 5: 659-674.

Strupczewski, W. G., Szymkiewicz, R. 1996. Analysis of paradoxes arising from the Chezy formula with constant roughness. II. Flow-area discharge curve. *Hydrological Sciences Journal*. 41, 5: 675-682.

Tarrade, L., Texier, A., David, L., Larinier, M. 2008. Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia*. 609: str. 177-188.

Toebe, G. H., Sooky, A. 1967. Hydraulics of meandering rivers with floodplains. *Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE*. 93, 2: 213-236.

Tominaga, A., Nezu, I. 1991. Turbulent structure in compound open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117, 1: 21-40.

Violeau, D. 2012. Fluid mechanics and the SPH method : Theory and applications, First Edition, Oxford: 522-531.

Webber, N.B. 2003. Fluid mechanics for civil engineers- S.I.Edition. Spon Press: 340 str.

Werner, M.G.F., Lambert, M.F. 2007. Comparison of modelling approaches used in practical flood extent modelling. *Journal of Hydraulic Research*. 45, 2: 202-215.

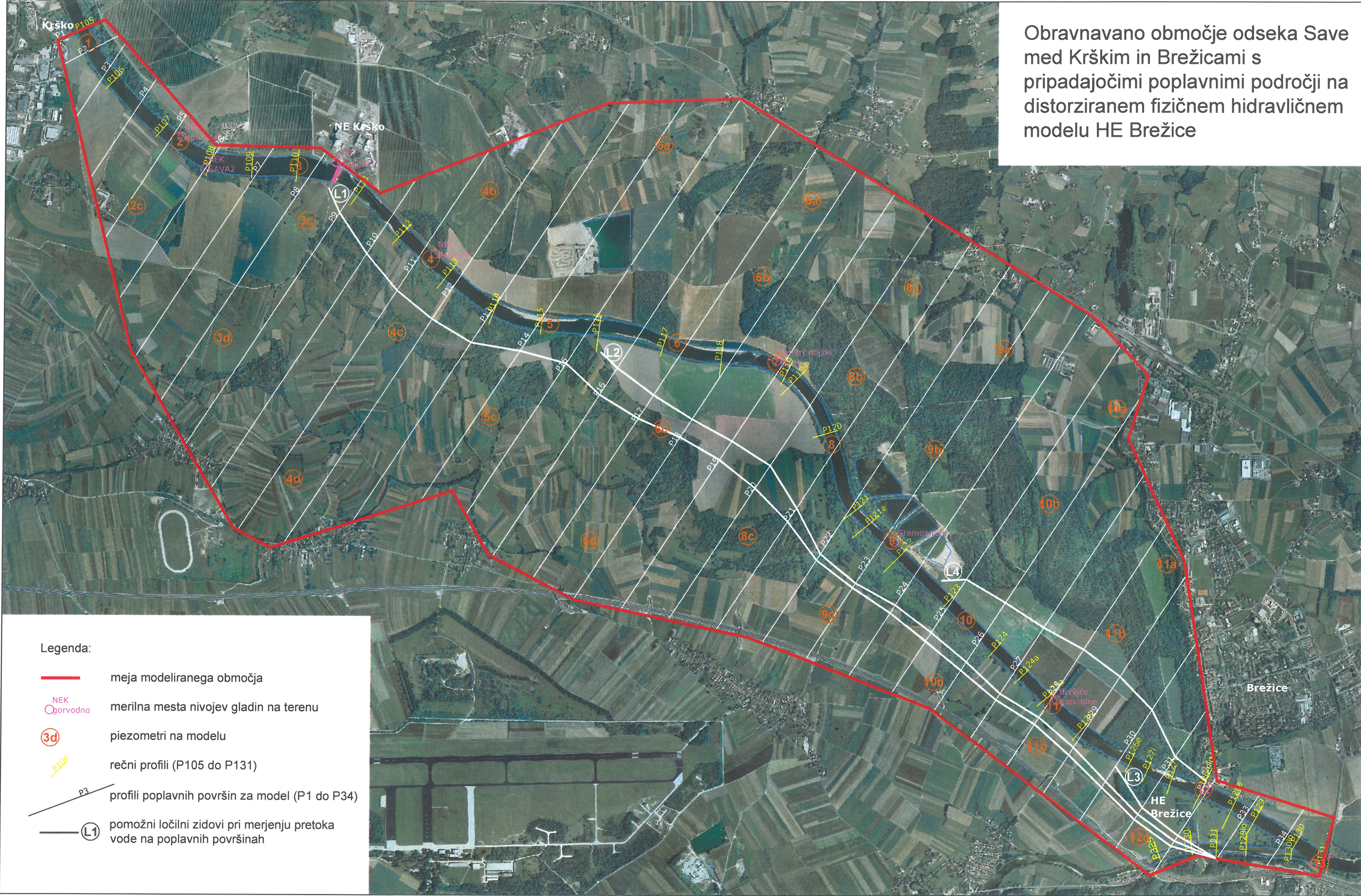
Wilcox, D.C. 1994. *Turbulence modelling for CFD*. California, USA, DCW Industries: 477 str.

Wu, F.C., Shen, H.W., Chou Y.J. 1999. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 125, 9: 934-942.

Wu, S., Rajaratnam, N., Katopodis, C. 1999. Structure of flow in vertical slot fishway. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125, 4: 351-360.

Zadnik, B. 1997. *Tehnični slovar za pregrade*. Ljubljana, SLOCOLD: 425 str.

Zheleznyakov, G.V. 1971. Interaction of channel and flood-plain streams. *Proceedings of 14th IAHR Congress, Paris, France* 5: 144-148.



PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga A.1: Obravnavano območje odseka Save med Krškim in Brežicami s pripadajočimi poplavnimi območji na distorziranem fizičnem hidravličnem modelu HE Brežice.

PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga A.2: Distorzirani hidravlični model HE Brežice v merilu 1:125/62.5 na Inštitutu za hidravlične raziskave v Ljubljani.

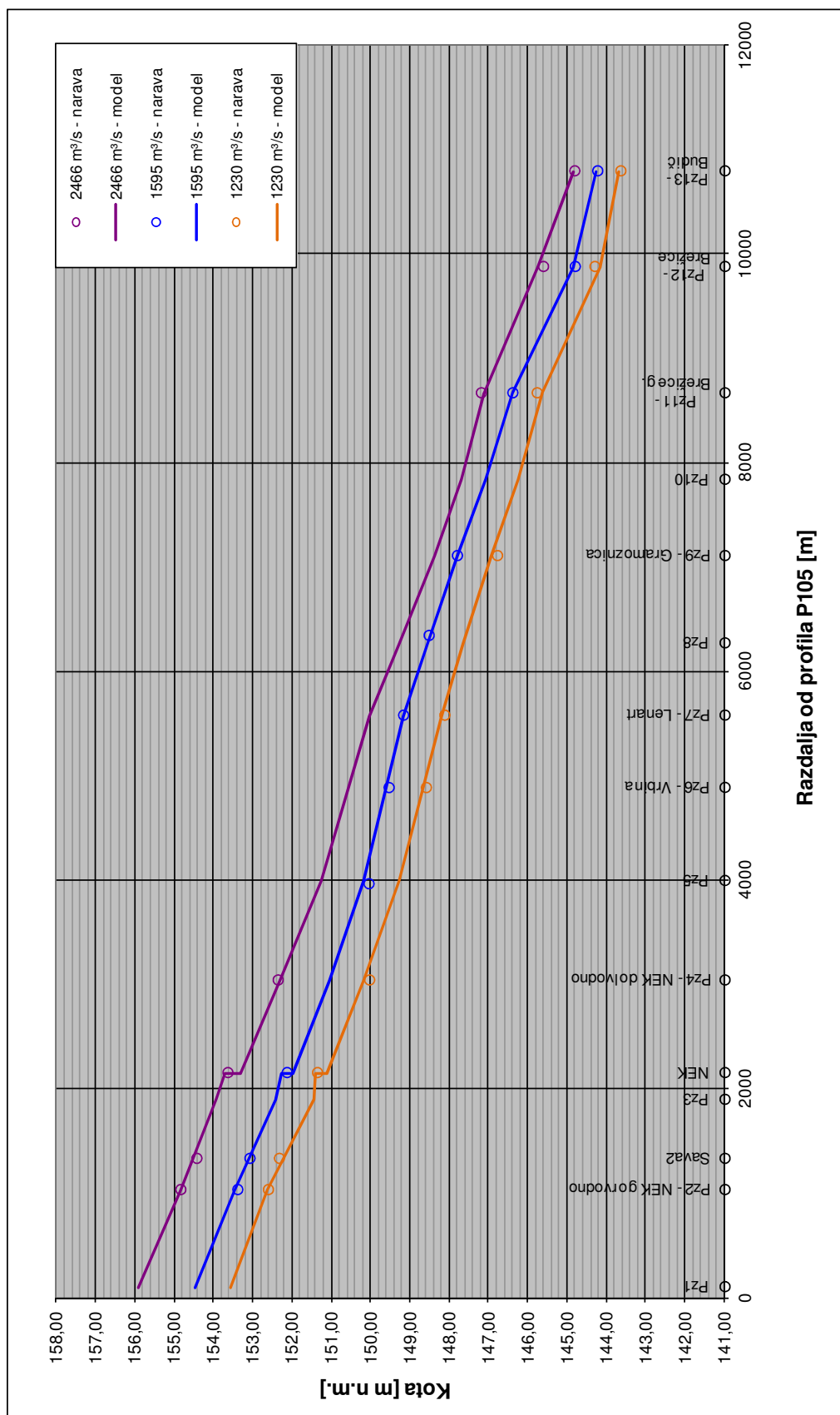


Priloga A.3: Tabela s podatki terenskih meritev nivojev gladin, meritev na umerjenem modelu ter medsebojna primerjava za pretoke 1230 m³/s (12. 12. 2008), 1595 m³/s (31. 3. 2009) in 2466 m³/s (19. 9. 2007).

Piezometer na modelu													
1	2	3	NEKčrp	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Merilno mesto v naravi													
	NEK gorvodn o		NEK črpališče	NEK dolvodno		Vrbina - LIM01	Lenart		Gramozn ica		Brežice gorvodn o	Brežice - LIM02	Budič
Stacionaža, [m]													
748070	747140	746256	746000	745111	744189	743256	742557	741783	741018	740238	739459	738243	737308
Q _{sava} = 1230 m³/s													
153,57	152,63	151,42	151,48	150,17	149,28		148,20	147,63	146,93	146,25	145,62	144,17	143,67
	152,62		151,37	150,04			148,60	148,13	146,79		145,78	144,31	143,65
	0,01		0,11	0,13				0,07	0,14		-0,16	-0,14	0,02
Q _{sava} = 1595 m³/s													
154,46	153,45	152,42	152,34	151,05	150,19		149,18	148,55	147,80	147,06	146,40	144,82	144,26
	153,4		152,14		150,06	149,55	149,18	148,53	147,81		146,40	144,81	144,24
	0,05		0,20		0,13		0,00	0,02	-0,01		0,00	0,01	0,02
Q _{sava} = 2466 m³/s													
155,90	154,82	153,94	153,78	152,28	151,26		150,03	149,27	148,38	147,69	147,11	145,75	144,85
	154,85		153,65	152,37							147,20	145,62	144,82
	-0,03		0,13	-0,09							-0,09	0,13	0,03

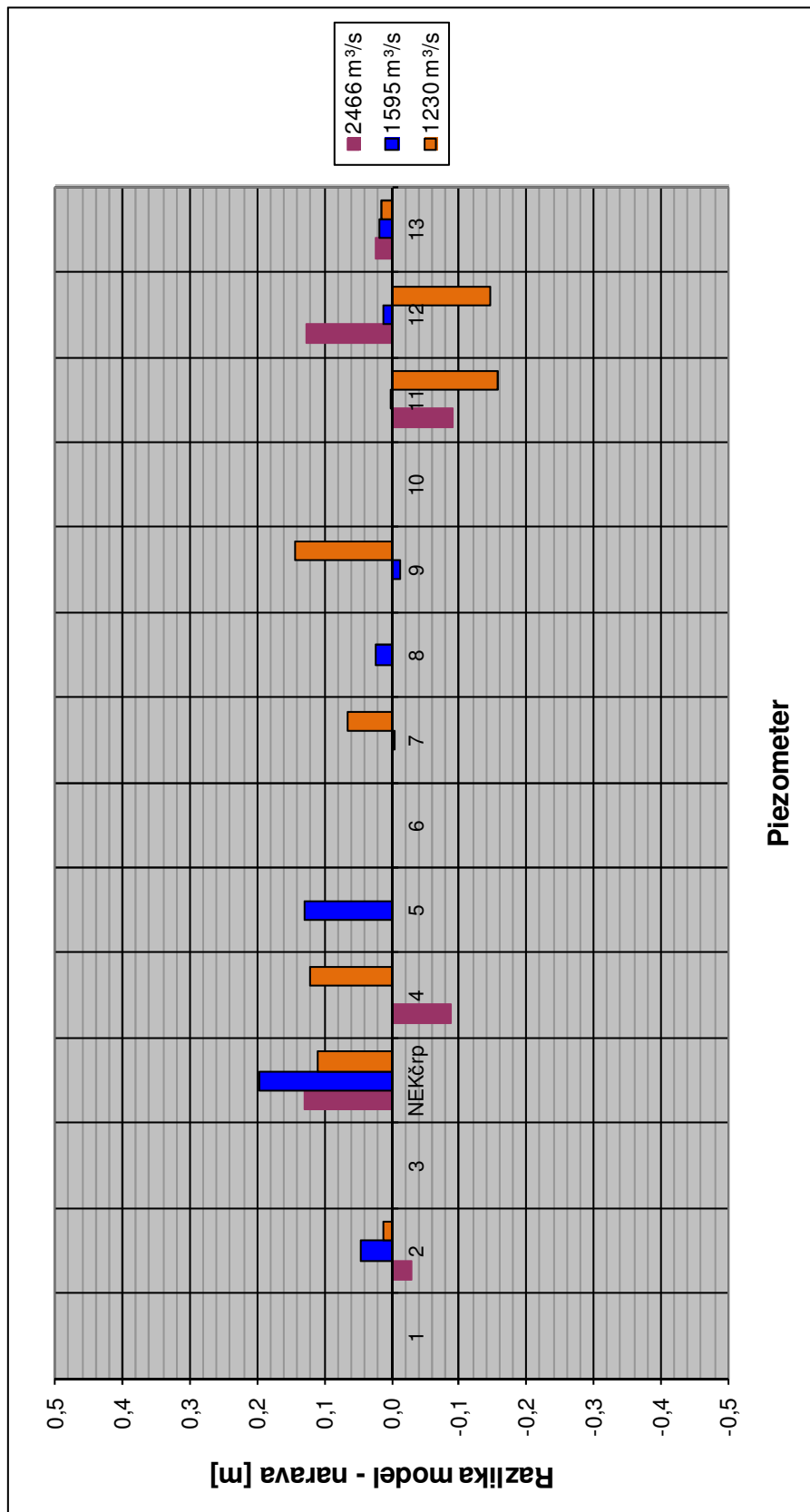
PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga A.4: Grafični prikaz poteka izmerjenih gladin v naravi in na umerjenem modelu za pretoke $1230 \text{ m}^3/\text{s}$ (12. 12. 2008), $1595 \text{ m}^3/\text{s}$ (31. 3. 2009) in $2466 \text{ m}^3/\text{s}$ (19. 9. 2007).



PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga A.5: Grafični prikaz razlik med meritvami nivojev gladin v naravi in na umerjenem modelu v posameznih piezometrih za pretoke $1230 \text{ m}^3/\text{s}$ (12. 12. 2008), $1595 \text{ m}^3/\text{s}$ (31. 3. 2009) in $2466 \text{ m}^3/\text{s}$ (19. 9. 2007).



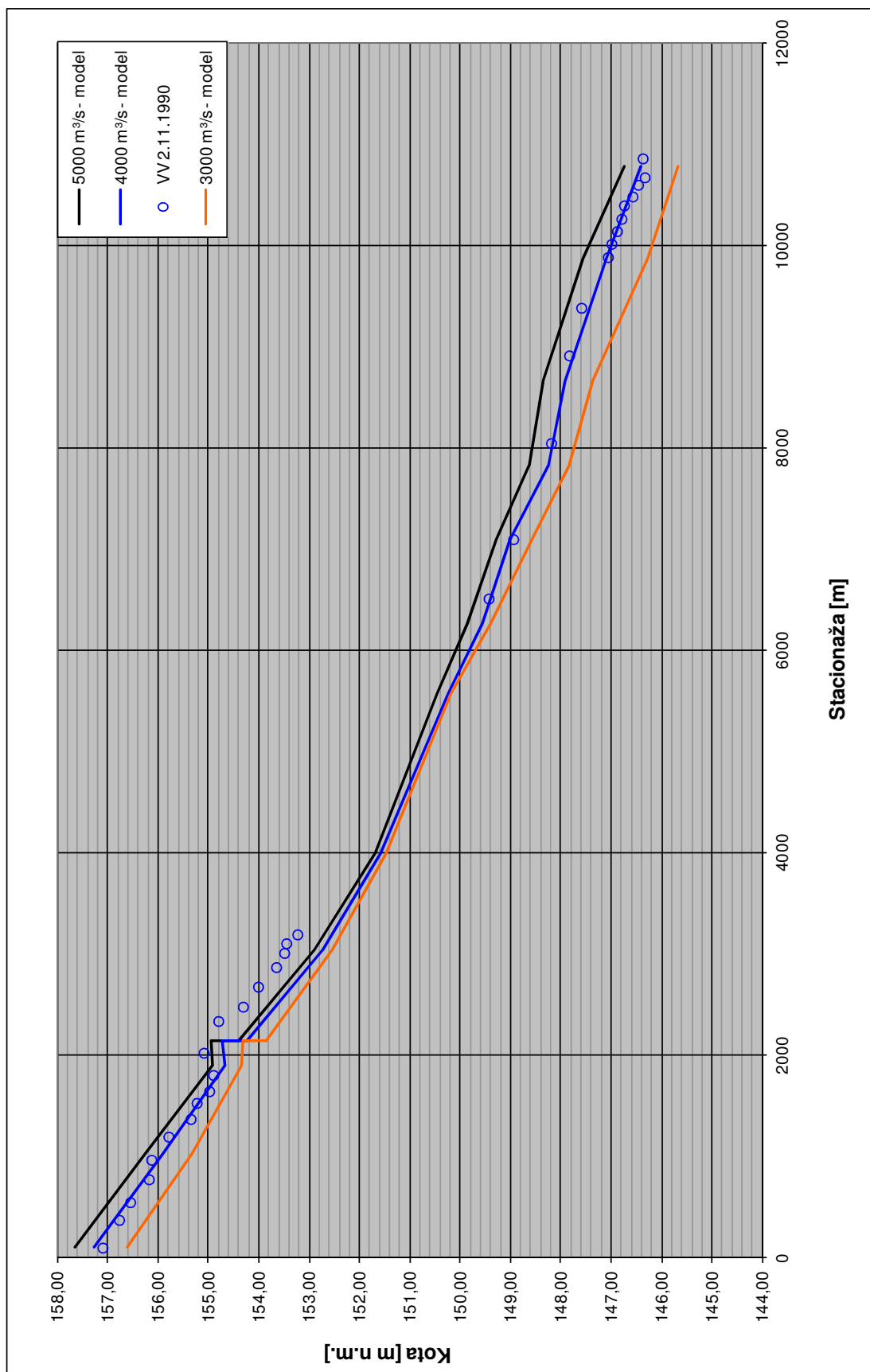
PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

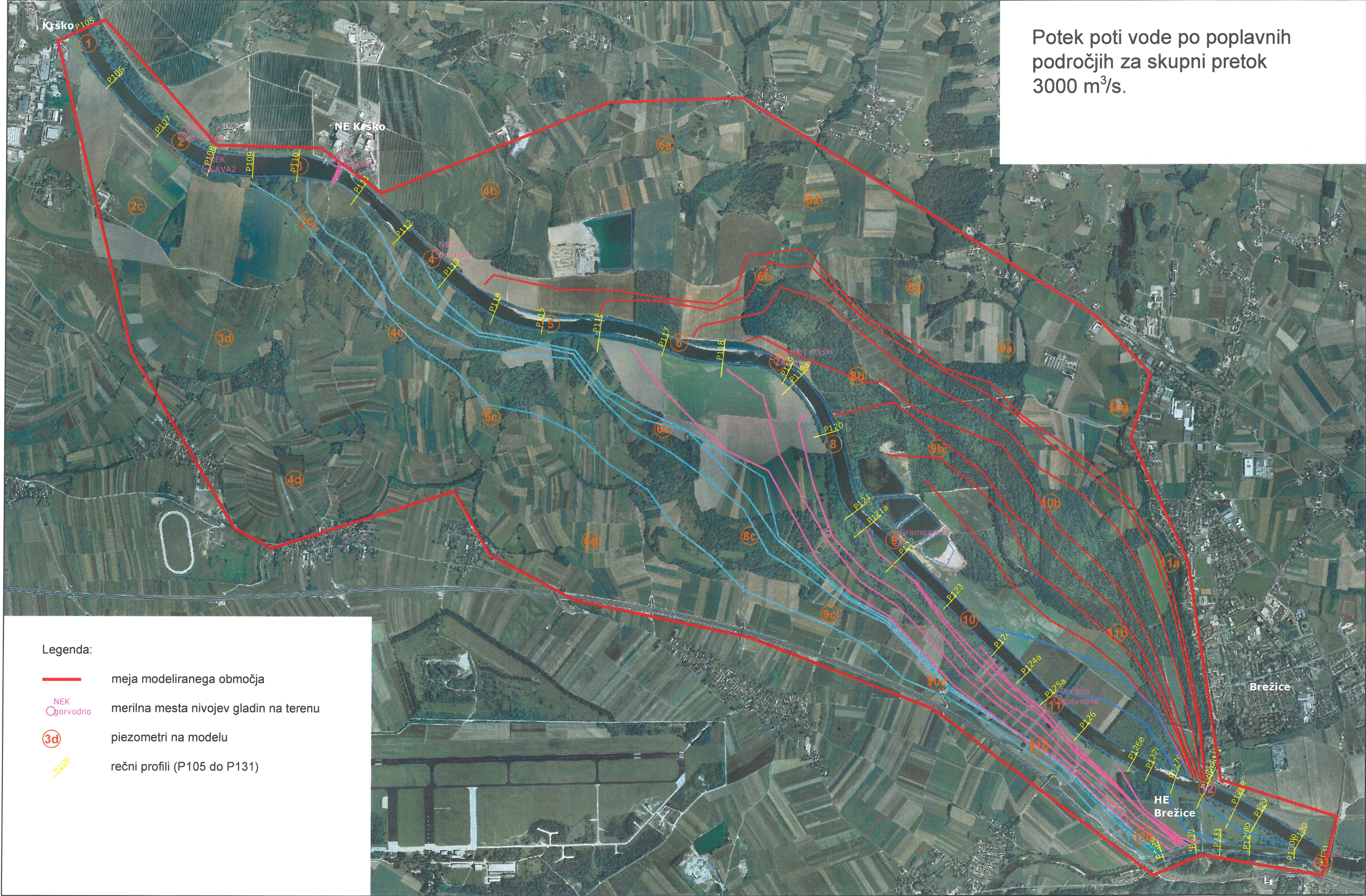
Priloga A.6: Rezultati meritev nivojev gladin na umerjenem modelu za pretoke 3000 m³/s, 4000 m³/s in 5000 m³/s.

Q _{sava} = 5000 m ³ /s															
piezometer v strugi	1	2	3	NEKčrp	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	157,65	156,25	154,90	155,04	152,89	151,69		150,46	149,85	149,27	148,63	148,36	147,57	146,74	
						5a	6a		8a	9a	10a				
	K _{gladine}	[m.n.m.]				150,63	149,14		148,52	148,47	148,44				
							6b		8b	9b	10b	11b			
piezometer na ret.									148,80	148,45	148,42	148,40			
	K _{gladine}	[m.n.m.]							8c	9c	10c	11c	12c		
		2c	3c		4c	5c									
	K _{gladine}	[m.n.m.]	155,96	153,82	152,81	152,38	150,22		149,73	149,43	148,62	148,35	148,01		
				3d	4d		6d								
piezometer na ret.					152,73		150,44								
	K _{gladine}	[m.n.m.]													
	Q _{sava} = 4000 m ³ /s														
	piezometer v strugi	1	2	3	NEKčrp	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		157,28	155,91	154,68	154,82	152,73	151,58		150,25	149,56	149,02	148,24	147,91	147,11	146,42
						5a				9a	10a				
K _{gladine}		[m.n.m.]				150,52				147,88	147,85				
							6b		8b	9b	10b	11b			
piezometer na ret.									148,65	147,87	147,83	147,79			
	K _{gladine}	[m.n.m.]													
		2c	3c		4c	5c	6c		8c	9c	10c	11c	12c		
	K _{gladine}	[m.n.m.]	155,58	153,58	152,53	151,97	149,93		149,39	149,18	148,27	147,82	147,32		
				3d	4d		6d								
piezometer na ret.					152,17		150,22								
	K _{gladine}	[m.n.m.]													
	Q _{sava} = 3000 m ³ /s														
	piezometer v strugi	1	2	3	NEKčrp	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		156,61	155,33	154,35	154,39	152,55	151,46		150,18	149,40	148,58	147,83	147,37	146,28	145,67
						5a				9a	10a				
K _{gladine}		[m.n.m.]				150,28				147,32	147,15				
							6b		8b	9b	10b	11b			
piezometer na ret.									148,63	147,37	147,14	147,12			
	K _{gladine}	[m.n.m.]					149,47								
			3c		4c	5c	6c		8c	9c	10c	11c	12c		
	K _{gladine}	[m.n.m.]	153,24		152,27	151,50	149,72		148,95	148,69	147,80	147,31	146,25		
							6d								
piezometer na ret.															
	K _{gladine}	[m.n.m.]					150,08								

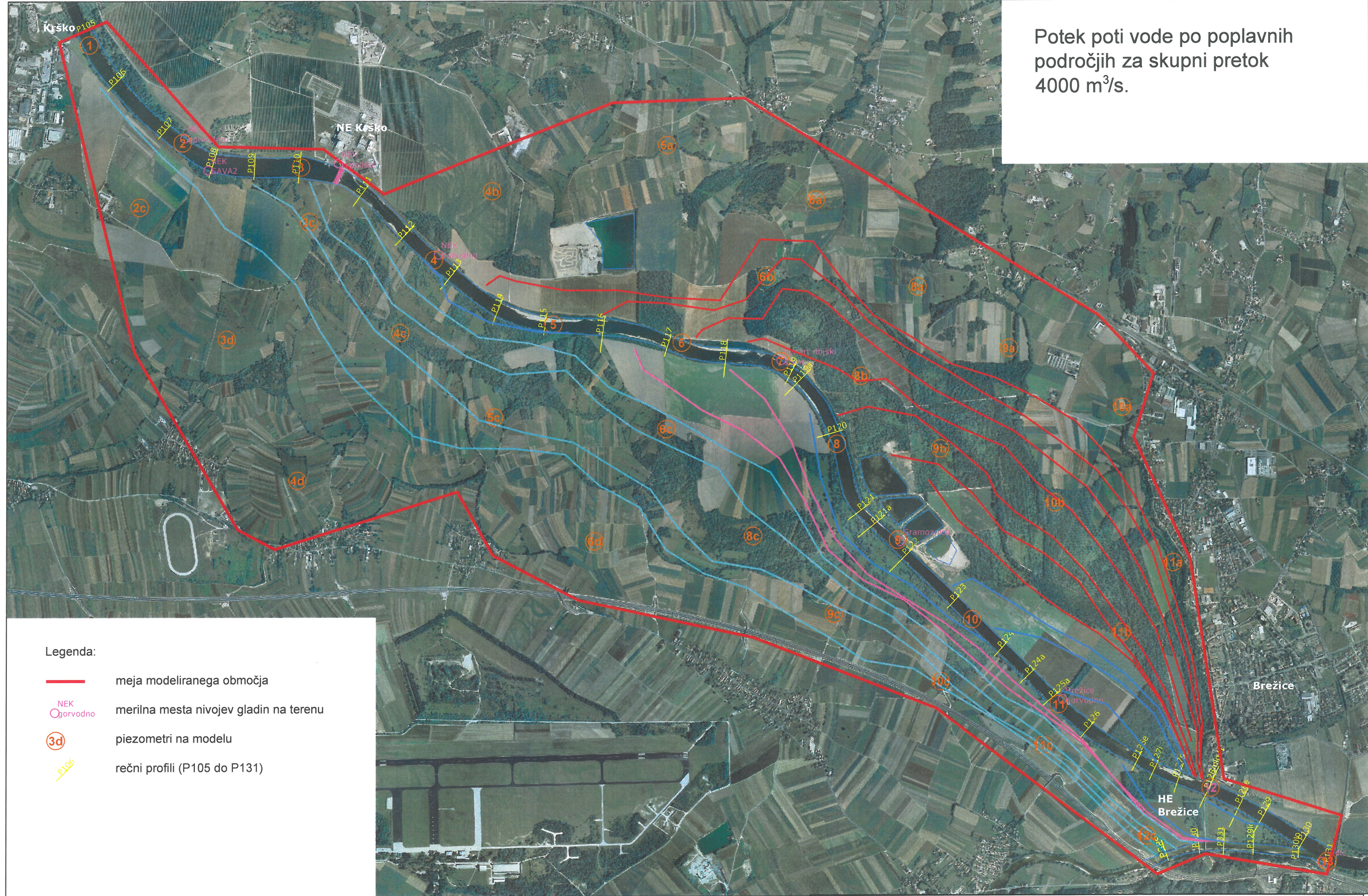
PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga A.7: Grafični prikaz poteka gladin na umerjenem modelu za pretoke 3000 m³/s, 4000 m³/s (s primerjavo z meritvami 2. 11. 1990) in 5000 m³/s.

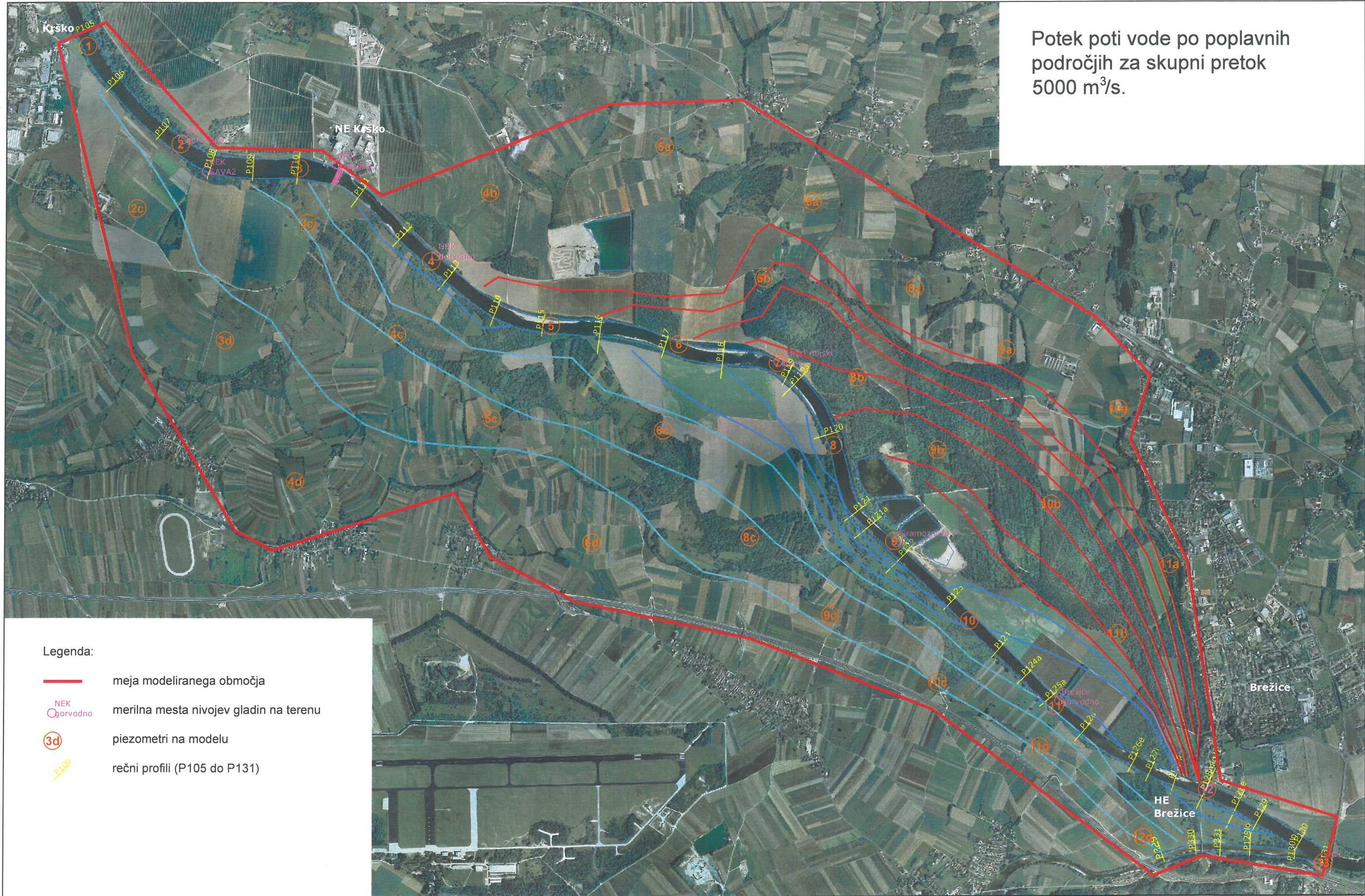




PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga A.8: Potek poti vode po poplavnih področjih za skupni pretok 3000 m³/s.



PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga A.9: Potek poti vode po poplavnih področjih za skupni pretok 4000 m³/s.



PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga A.10: Potek poti vode po poplavnih področjih za skupni pretok 5000 m³/s.

PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga A.11: Tabela s podatki razdelitve pretokov na levi in desni poplavni površini ter strugo za pretoke 3000 m³/s, 4000 m³/s in 5000 m³/s.

skupni pretok [m ³ /s]	desna poplavna površina							
	med P105 in NEK		med NEK in P116		med P116 in P126e		skupaj	
	[m ³ /s]	[%]	[m ³ /s]	[%]	[m ³ /s]	[%]	[m ³ /s]	[%]
3000	136	4,5%	45	1,5%	452	15,1%	633	21,1%
4000	749	18,7%	101	2,5%	245	6,1%	1095	27,4%
5000	1537	30,7%	67	1,3%	-173	-3,5%	1604	32,1%

skupni pretok [m ³ /s]	leva popl. površina		skupaj popl. površina		struga ob gramoznici	
	med P113 in P121					
	[m ³ /s]	[%]	[m ³ /s]	[%]	[m ³ /s]	[%]
3000	352	11,7%	985	32,8%	2015	67,2%
4000	661	16,5%	1756	43,9%	2244	56,1%
5000	999	20,0%	2603	52,1%	2397	47,9%

PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga A.12: Pretok 3000 m³/s na distorziranem hidravličnem modelu HE Brežice s prikazanimi obarvanimi potmi vode po poplavnih površinah.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na desnem bregu pri profilu P109.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na levem bregu pri profilu P116.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na desnem bregu pri profilu P109.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na levem bregu pri profilu P116.

PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga A.13: Pretok $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ na distorziranem hidravličnem modelu HE Brežice s prikazanimi obarvanimi potmi vode po poplavnih površinah.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na desnem bregu pri profilu P109.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na levem bregu pri profilu P116.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na desnem bregu pri profilu P109.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na levem bregu pri profilu P116.

PRILOGA A: REZULTATI FIZIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga A.14: Pretok 5000 m³/s na distorziranem hidravličnem modelu HE Brežice s prikazanimi obarvanimi potmi vode po poplavnih površinah.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na desnem bregu pri profilu P109.



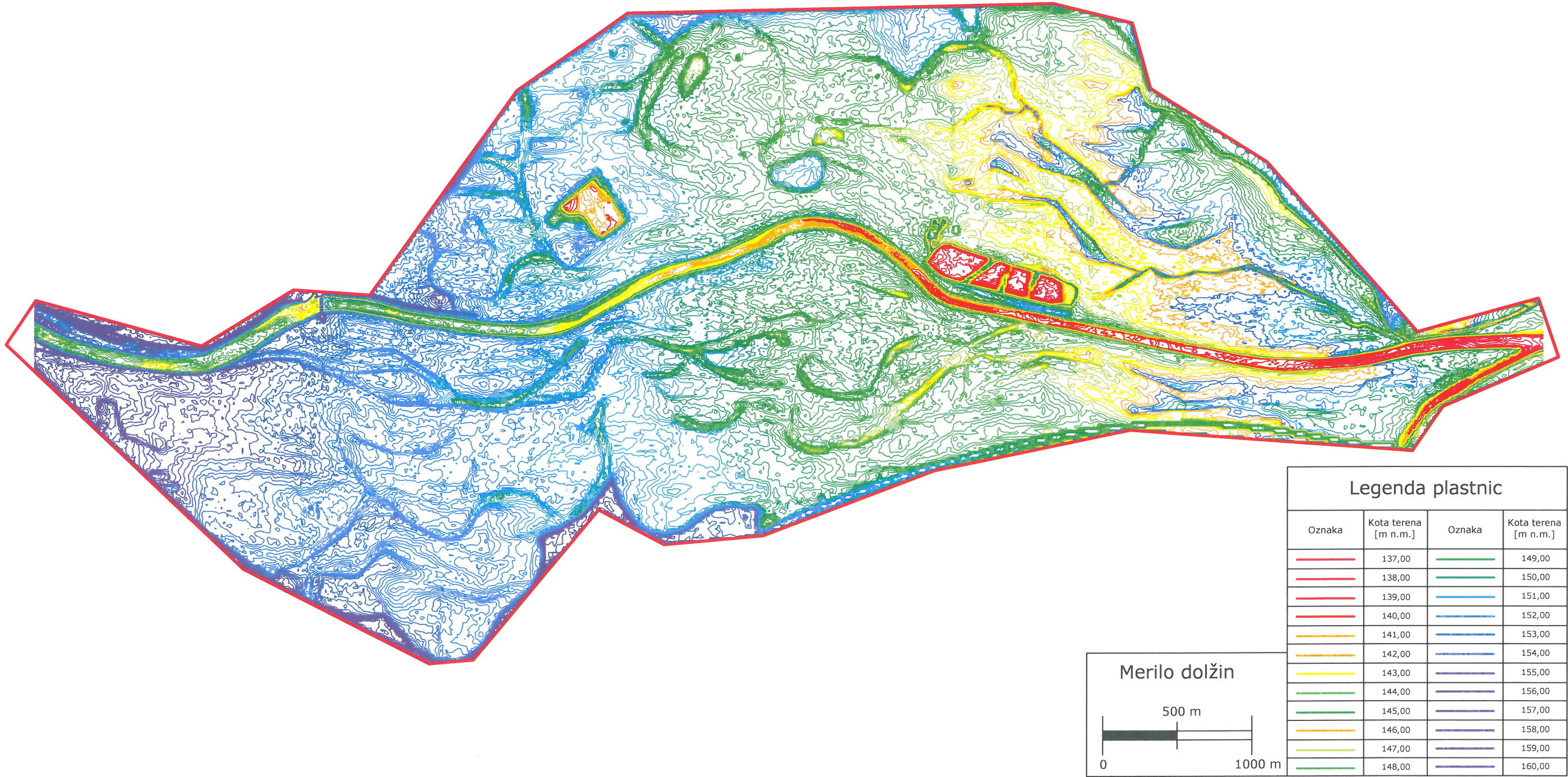
Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na levem bregu pri profilu P116.



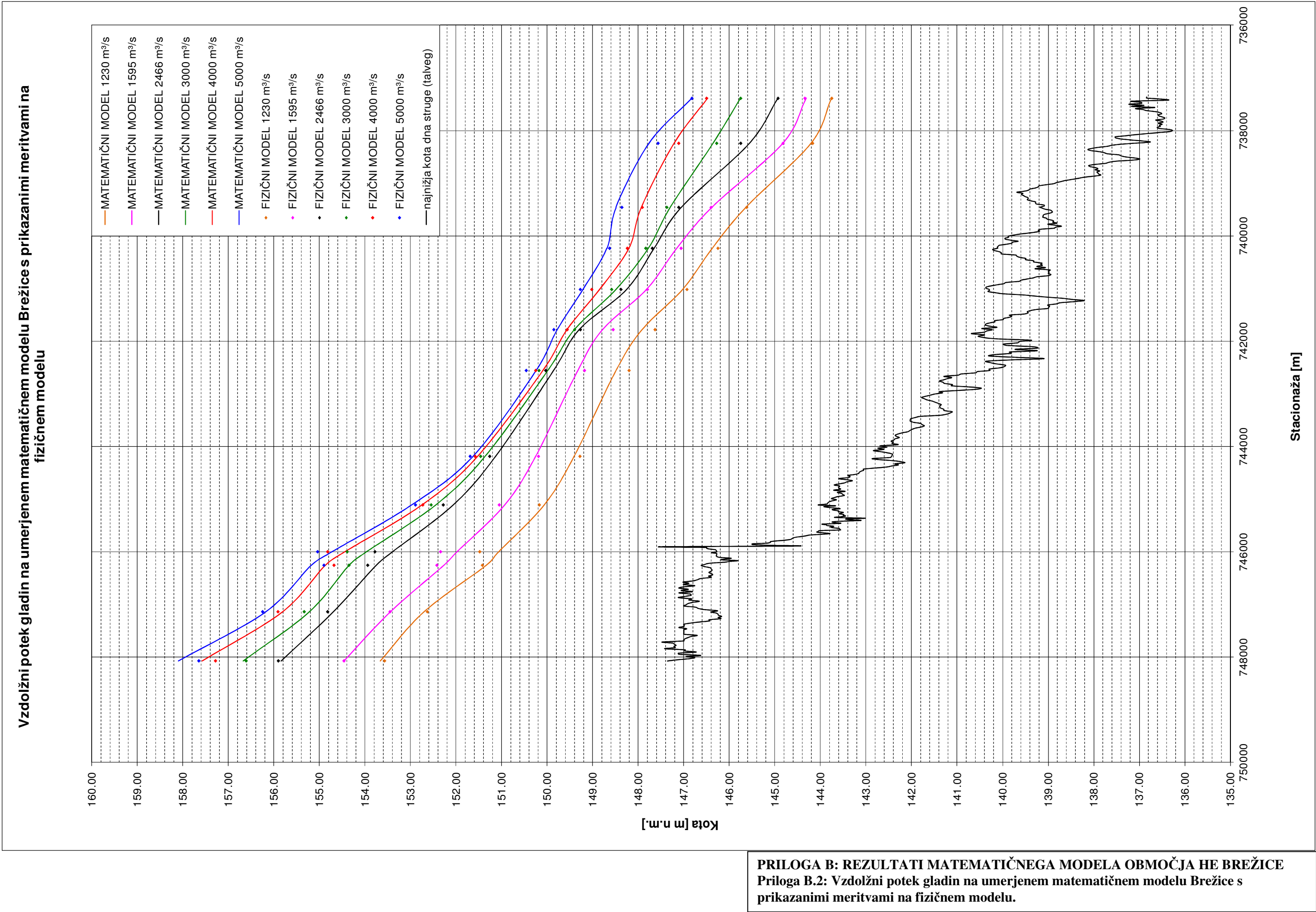
Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na desnem bregu pri profilu P109.



Pot vode po desni poplavni površini z začetkom na levem bregu pri profilu P116.



PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.1: Plastnice obravnavanega območja HE Brežice, uporabljene v matematičnem modelu.



PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga B.3: Tabela izračunanih nivojev gladin v strugi Save z umerjenim matematičnim modelom, meritev na fizičnem modelu ter medsebojna primerjava za pretoke 1230 m³/s (12. 12. 2008), 1595 m³/s (31. 3. 2009), 2466 m³/s (19. 9. 2007), 3000 m³/s, 4000 m³/s (2. 11. 1990) in 5000 m³/s.

	Oznaka točke	P1	P2	P3	NEK črpališče	P4	P5	P7	P8	P9	P10	P11	P12	sp.rob.pogoj
	Stacionaža [m]	748070	747140	746256	746000	745111	744189	742557	741783	741018	740238	739459	738243	737388
Matematični model	Q _{SAVA} = 1230 m ³ /s	153,66	152,71	151,34	151,07	150,07	149,41	148,49	147,92	147,03	146,38	145,64	144,21	143,75
	Q _{SAVA} = 1595 m ³ /s	154,46	153,44	152,27	151,98	150,93	150,25	149,32	148,78	147,81	147,15	146,38	144,82	144,34
	Q _{SAVA} = 2466 m ³ /s	155,84	154,70	153,76	153,40	152,06	151,13	149,86	149,30	148,25	147,65	147,05	145,55	144,93
	Q _{SAVA} = 3000 m ³ /s	156,67	155,22	154,35	153,97	152,44	151,36	149,98	149,40	148,48	147,77	147,29	146,35	145,75
	Q _{SAVA} = 4000 m ³ /s	157,57	155,81	154,87	154,45	152,75	151,53	150,09	149,57	148,85	148,21	147,93	147,21	146,50
Fizični model	Q _{SAVA} = 5000 m ³ /s	158,10	156,18	155,18	154,73	152,98	151,63	150,24	149,78	149,21	148,69	148,49	147,76	146,82
	Q _{SAVA} = 1230 m ³ /s	153,57	152,63	151,42	151,48	150,17	149,28	148,20	147,63	146,93	146,25	145,62	144,17	143,75
	Q _{SAVA} = 1595 m ³ /s	154,46	153,45	152,42	152,34	151,05	150,19	149,18	148,55	147,80	147,06	146,40	144,82	144,34
	Q _{SAVA} = 2466 m ³ /s	155,90	154,82	153,94	153,78	152,28	151,26	150,03	149,27	148,38	147,69	147,11	145,75	144,93
	Q _{SAVA} = 3000 m ³ /s	156,61	155,33	154,35	154,39	152,55	151,46	150,18	149,40	148,58	147,83	147,37	146,28	145,75
Matematični - fizični model	Q _{SAVA} = 4000 m ³ /s	157,28	155,91	154,68	154,82	152,73	151,58	150,25	149,56	149,02	148,24	147,91	147,11	146,50
	Q _{SAVA} = 5000 m ³ /s	157,65	156,25	154,90	155,04	152,89	151,69	150,46	149,85	149,27	148,63	148,36	147,57	146,82
	Q _{SAVA} = 1230 m ³ /s	0,09	0,08	-0,08	-0,41	-0,10	0,13	0,29	0,29	0,10	0,13	0,02	0,04	0,00
	Q _{SAVA} = 1595 m ³ /s	0,00	-0,01	-0,15	-0,36	-0,12	0,06	0,14	0,23	0,01	0,09	-0,02	0,00	0,00
	Q _{SAVA} = 2466 m ³ /s	-0,06	-0,12	-0,18	-0,38	-0,22	-0,13	-0,17	0,03	-0,13	-0,04	-0,06	-0,20	0,00
	Q _{SAVA} = 3000 m ³ /s	0,06	-0,11	0,00	-0,42	-0,10	-0,10	-0,20	0,00	-0,10	-0,06	-0,08	0,08	0,00
	Q _{SAVA} = 4000 m ³ /s	0,29	-0,10	0,19	-0,37	0,02	-0,05	-0,16	0,01	-0,17	-0,03	0,02	0,10	0,00
	Q _{SAVA} = 5000 m ³ /s	0,45	-0,06	0,28	-0,31	0,09	-0,06	-0,22	-0,07	-0,06	0,06	0,13	0,20	0,00

PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga B.4.1: Tabela izračunanih nivojev gladin z umerjenim matematičnim modelom, meritev na fizičnem modelu ter medsebojna primerjava za pretok 3000 m³/s.

	Koordinata x	Koordinata y	Oznaka	Kota (fiz.)	Kota (mat.)	mat.-fiz.
	[-]	[-]	[-]	[m n. m.]	[m n. m.]	[m]
Gladine v strugi	328	2	P1	156,61	156,67	-0,06
	401	46	P2	155,33	155,22	0,11
	299	85	P3	154,35	154,35	0,00
	247	102	NEK črpališče	154,39	153,97	0,42
	313	166	P4	152,55	152,44	0,11
	289	212	P5	151,46	151,36	0,10
	80	285	P7	150,18	149,98	0,20
	167	316	P8	149,40	149,40	0,00
	278	352	P9	148,58	148,48	0,10
	338	388	P10	147,83	147,77	0,06
	396	429	P11	147,37	147,29	0,08
	368	489	P12	146,28	146,35	-0,07
	363	532	sp.rob.pogoj	145,75	145,75	0,00
Gladine na poplavnih površinah	456	46	2c	*	**	#####
	395	111	3c	153,24	153,63	-0,39
	478	104	3d	*	**	#####
	444	169	4c	152,27	**	#####
	505	167	4d	*	**	#####
	32	211	5a	150,28	**	#####
	450	212	5c	151,50	151,41	0,09
	21	265	6a	*	**	#####
	52	265	6b	149,47	**	#####
	351	264	6c	149,72	149,73	-0,01
	467	264	6d	150,08	**	#####
	27	310	8a	*	**	#####
	63	310	8b	148,63	148,81	-0,18
	436	309	8c	148,95	148,88	0,07
	27	348	9a	147,32	**	#####
	69	347	9b	147,37	**	#####
	444	347	9c	148,69	**	#####
	24	392	10a	147,15	**	#####
	64	390	10b	147,14	147,24	-0,10
	444	391	10c	147,80	147,59	0,21
	180	434	11b	147,12	147,20	-0,08
	443	432	11c	147,31	147,19	0,12
	450	479	12c	146,25	146,52	-0,27

Opomba:

* ni podatka s fizičnega modela / točka ni poplavljen

** točka v matematičnem modelu ni poplavljen

PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

Priloga B.4.2: Tabela izračunanih nivojev gladin z umerjenim matematičnim modelom, meritev na fizičnem modelu ter medsebojna primerjava za pretok 4000 m³/s (2. 11. 1990).

	Koordinata x	Koordinata y	Oznaka	Kota (fiz.)	Kota (mat.)	mat.-fiz.
	[-]	[-]	[-]	[m n. m.]	[m n. m.]	[m]
Gladine v strugi	328	2	P1	157,28	157,57	-0,29
	401	46	P2	155,91	155,81	0,10
	299	85	P3	154,68	154,87	-0,19
	247	102	NEK črpališče	154,82	154,45	0,37
	313	166	P4	152,73	152,75	-0,02
	289	212	P5	151,58	151,53	0,05
	80	285	P7	150,25	150,09	0,16
	167	316	P8	149,56	149,57	-0,01
	278	352	P9	149,02	148,85	0,17
	338	388	P10	148,24	148,21	0,03
	396	429	P11	147,91	147,93	-0,02
	368	489	P12	147,11	147,21	-0,10
	363	532	sp.rob.pogoj	146,50	146,50	0,00
Gladine na poplavnih površinah	456	46	2c	155,58	155,75	-0,17
	395	111	3c	153,58	154,03	-0,45
	478	104	3d	153,10	**	#####
	444	169	4c	152,53	152,74	-0,21
	505	167	4d	152,17	**	#####
	32	211	5a	150,52	**	#####
	450	212	5c	151,97	151,89	0,08
	21	265	6a	*	**	#####
	52	265	6b	149,55	149,67	-0,12
	351	264	6c	149,93	149,87	0,06
	467	264	6d	150,22	**	#####
	27	310	8a	148,65	**	#####
	63	310	8b	*	148,90	#####
	436	309	8c	149,39	149,33	0,06
	27	348	9a	147,88	148,00	-0,12
	69	347	9b	147,87	148,01	-0,14
	444	347	9c	149,18	149,03	0,15
	24	392	10a	147,85	147,97	-0,12
	64	390	10b	147,83	147,96	-0,13
	444	391	10c	148,27	148,20	0,07
	180	434	11b	147,79	147,93	-0,14
	443	432	11c	147,82	147,89	-0,07
	450	479	12c	147,32	147,49	-0,17

Opomba:

* ni podatka s fizičnega modela / točka ni poplavljen

** točka v matematičnem modelu ni poplavljen

PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE

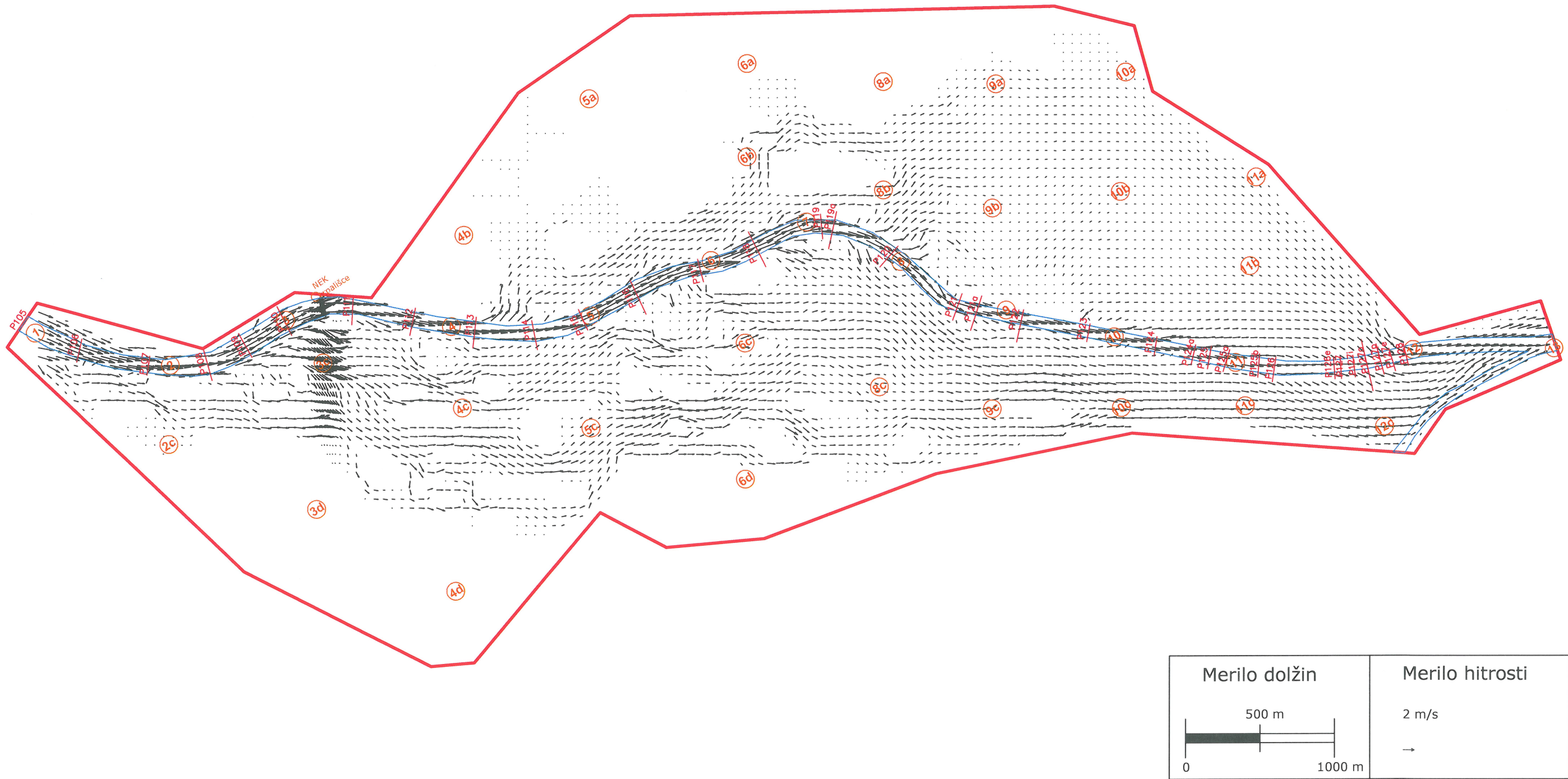
Priloga B.4.3: Tabela izračunanih nivojev gladin z umerjenim matematičnim modelom, meritev na fizičnem modelu ter medsebojna primerjava za pretok 5000 m³/s.

	Koordinata x	Koordinata y	Oznaka	Kota (fiz.)	Kota (mat.)	mat.-fiz.
	[-]	[-]	[-]	[m n. m.]	[m n. m.]	[m]
Gladine v strugi	328	2	P1	157,65	158,10	-0,45
	401	46	P2	156,25	156,18	0,07
	299	85	P3	154,90	155,18	-0,28
	247	102	NEK črpališče	155,04	154,73	0,31
	313	166	P4	152,89	152,98	-0,09
	289	212	P5	151,69	151,63	0,06
	80	285	P7	150,46	150,24	0,22
	167	316	P8	149,85	149,78	0,07
	278	352	P9	149,27	149,21	0,06
	338	388	P10	148,63	148,69	-0,06
	396	429	P11	148,36	148,49	-0,13
	368	489	P12	147,57	147,76	-0,19
	363	532	sp.rob.pogoj	146,82	146,82	0,00
Gladine na poplavnih površinah	456	46	2c	155,96	156,10	-0,14
	395	111	3c	153,82	154,27	-0,45
	478	104	3d	153,50	153,53	-0,03
	444	169	4c	152,81	153,00	-0,19
	505	167	4d	152,73	152,60	0,13
	32	211	5a	150,63	**	#####
	450	212	5c	152,38	152,27	0,11
	21	265	6a	149,14	**	#####
	52	265	6b	149,67	149,73	-0,06
	351	264	6c	150,22	150,26	-0,04
	467	264	6d	150,44	**	#####
	27	310	8a	148,52	**	#####
	63	310	8b	148,80	148,94	-0,14
	436	309	8c	149,73	149,67	0,06
	27	348	9a	148,47	148,60	-0,13
	69	347	9b	148,45	148,60	-0,15
	444	347	9c	149,43	149,36	0,07
	24	392	10a	148,44	148,58	-0,14
	64	390	10b	148,42	148,57	-0,15
	444	391	10c	148,62	148,70	-0,08
	180	434	11b	148,40	148,52	-0,12
	443	432	11c	148,35	148,45	-0,10
	450	479	12c	148,01	148,11	-0,10

Opomba:

* ni podatka s fizičnega modela / točka ni poplavljen

** točka v matematičnem modelu ni poplavljen

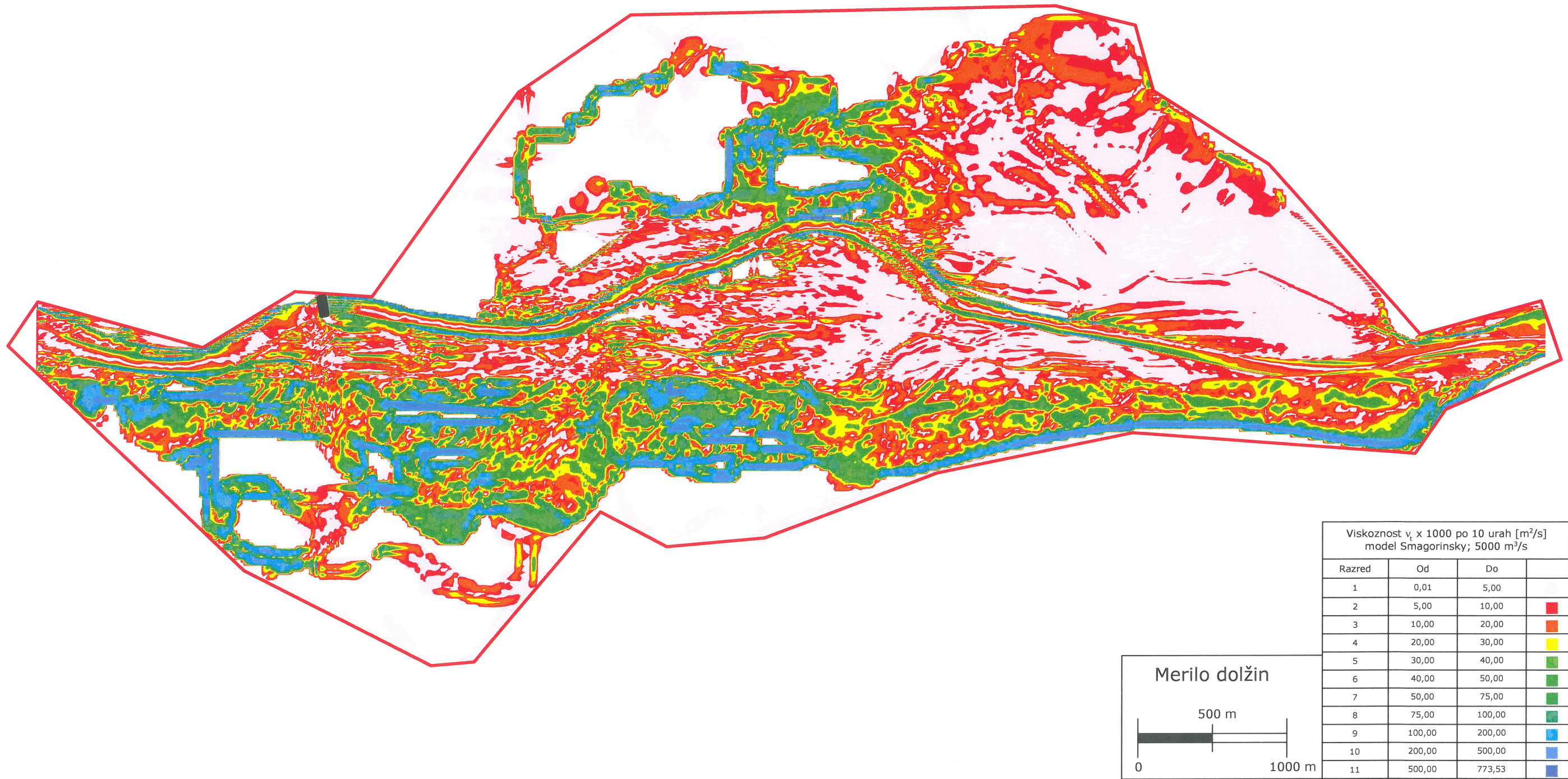


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.5: Hitrostno polje na umerjenem matematičnem modelu pri skupnem pretoku
 $Q = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

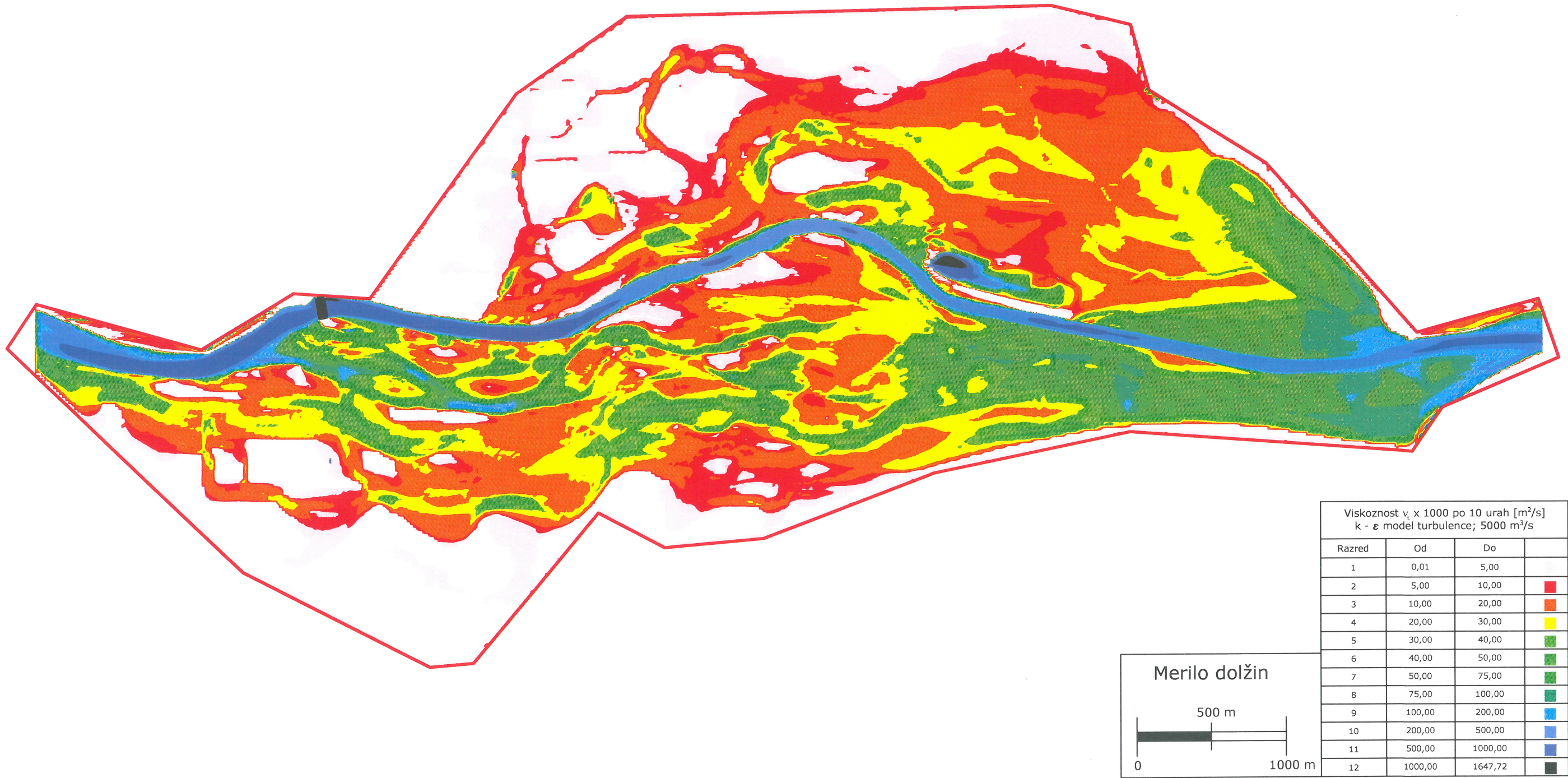




PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.7: Prostorska razporeditev koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t \times 1000$ pri skupnem pretoku $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$; model konstantne turbulentne viskoznosti.



PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.8: Prostorska razporeditev koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t \times 1000$ pri skupnem pretoku $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$; model Smagorinsky; $C_s = 0,17$.

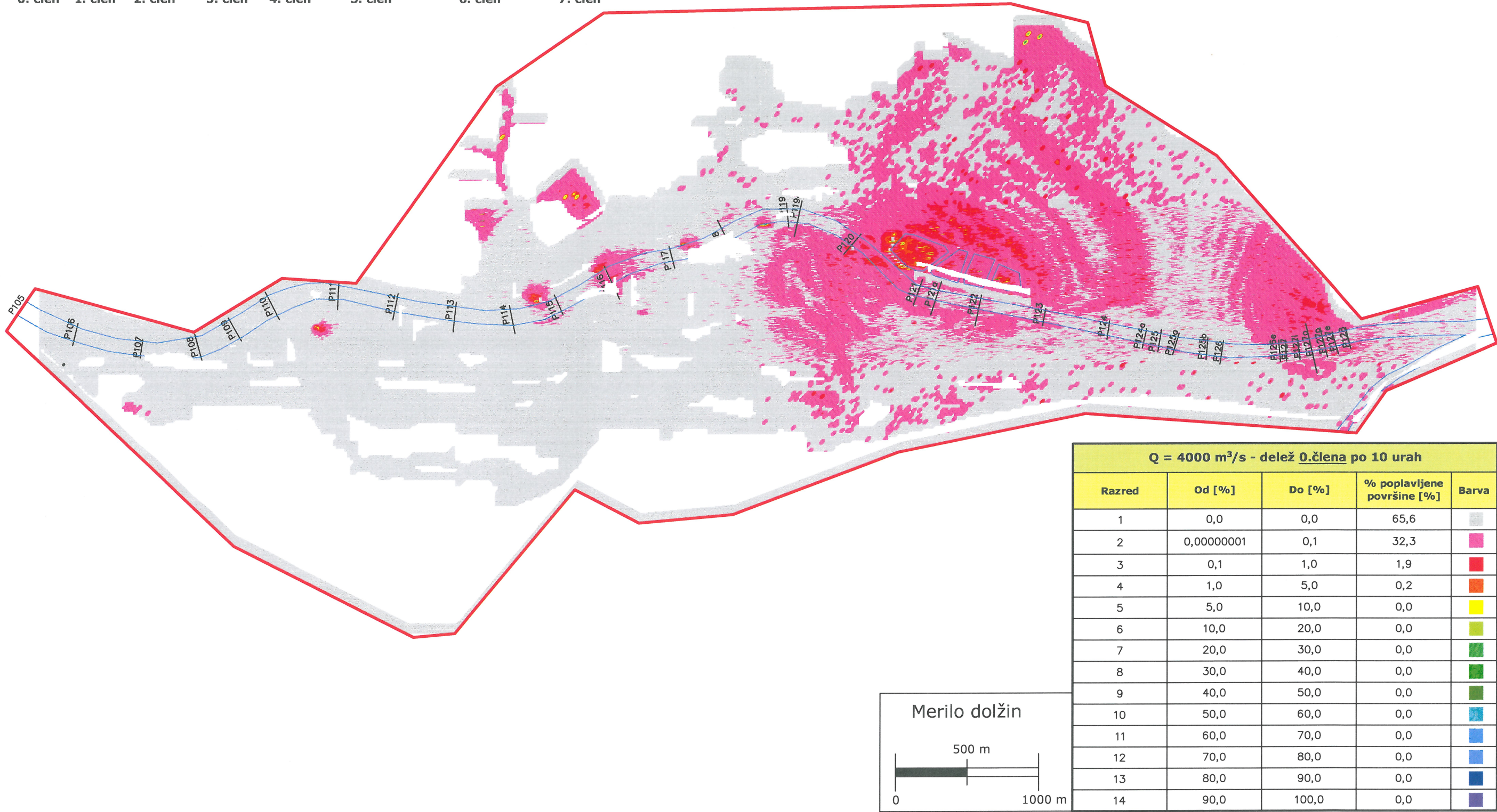


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.9: Prostorska razporeditev koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t \times 1000$ pri skupnem pretoku $Q = 5000 \text{ m}^3/\text{s}$; $k - \epsilon$ model turbulence.

Dinamična enačba za y smer (~v smeri toka)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial y} - gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_g^2\frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

0. člen1. člen2. člen3. člen4. člen5. člen6. člen7. člen

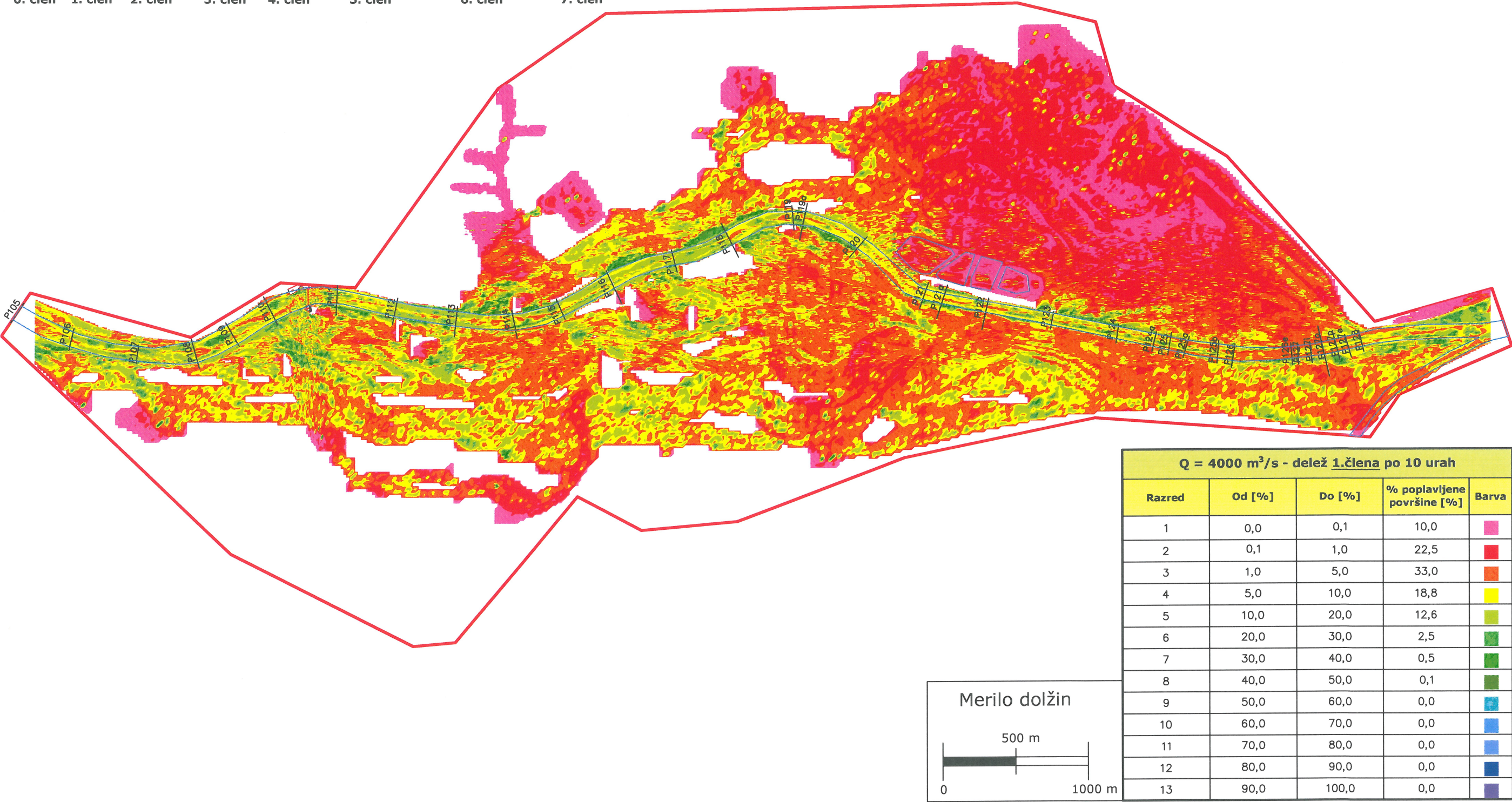


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.10: Vpliv 0. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za y smer (~v smeri toka)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial y} - gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_g^2\frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

0. člen1. člen2. člen3. člen4. člen5. člen6. člen7. člen

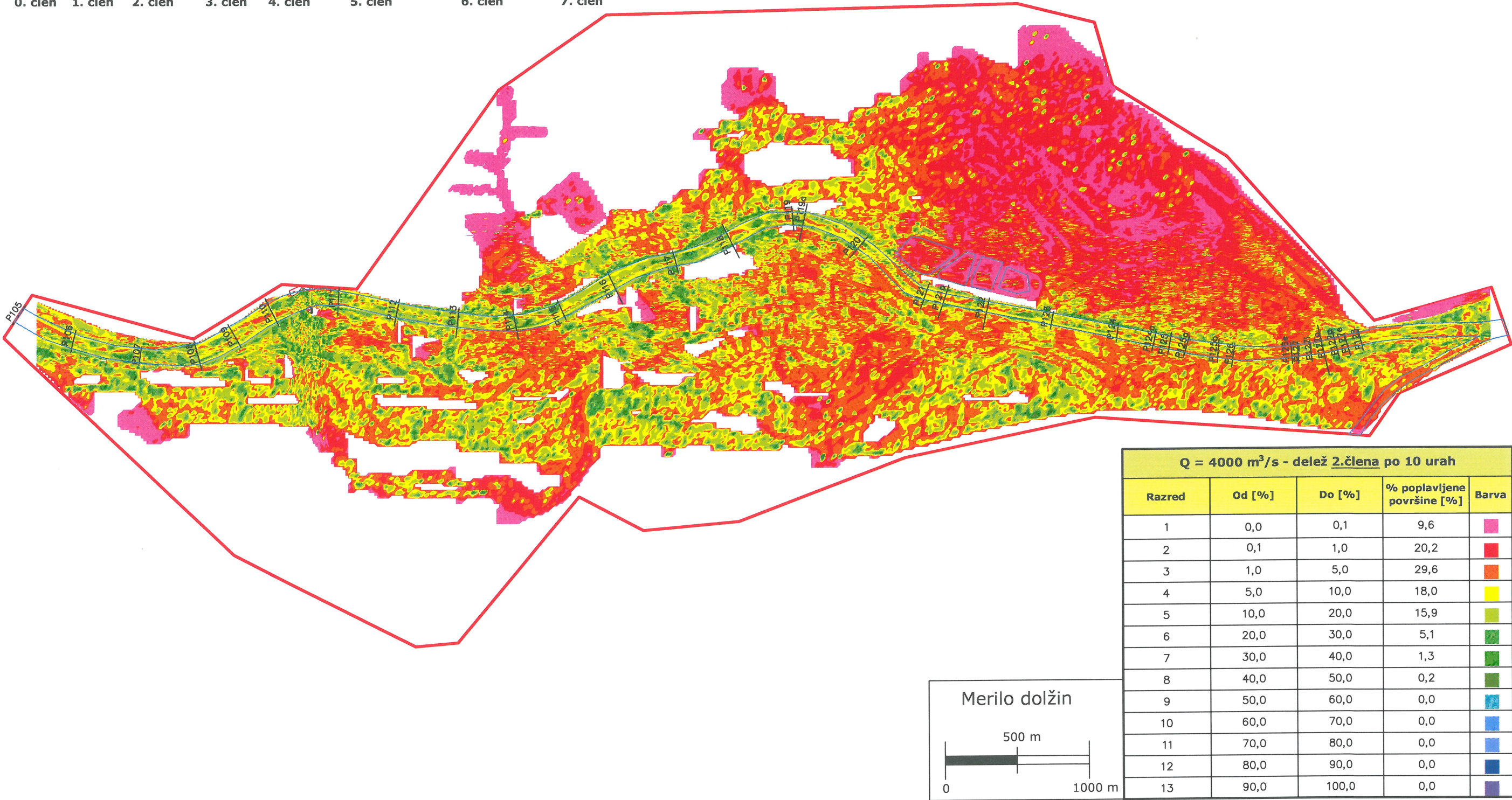


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.11: Vpliv 1. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za y smer (~v smeri toka)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial y} - gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_s^2\frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_i\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_i\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

0. člen1. člen2. člen3. člen4. člen5. člen6. člen7. člen

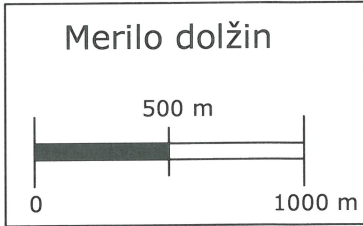


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.12: Vpliv 2. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za y smer (≈v smeri toka)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial y} - gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_g^2\frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

0. člen1. člen2. člen3. člen4. člen5. člen6. člen7. člen



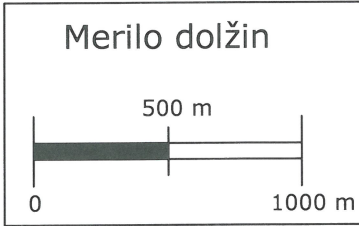
Q = 4000 m³/s - delež 3.člena po 10 urah				
Razred	Od [%]	Do [%]	% poplavljene površine [%]	Barva
1	0,0	0,1	0,0	
2	0,1	1,0	0,2	
3	1,0	5,0	1,1	
4	5,0	10,0	2,1	
5	10,0	20,0	6,7	
6	20,0	30,0	10,7	
7	30,0	40,0	18,6	
8	40,0	50,0	57,0	
9	50,0	60,0	2,8	
10	60,0	70,0	0,5	
11	70,0	80,0	0,2	
12	80,0	90,0	0,1	
13	90,0	100,0	0,0	

PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.13: Vpliv 3. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za y smer (~v smeri toka)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial y} - gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_s^2\frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

0. člen1. člen2. člen3. člen4. člen5. člen6. člen7. člen



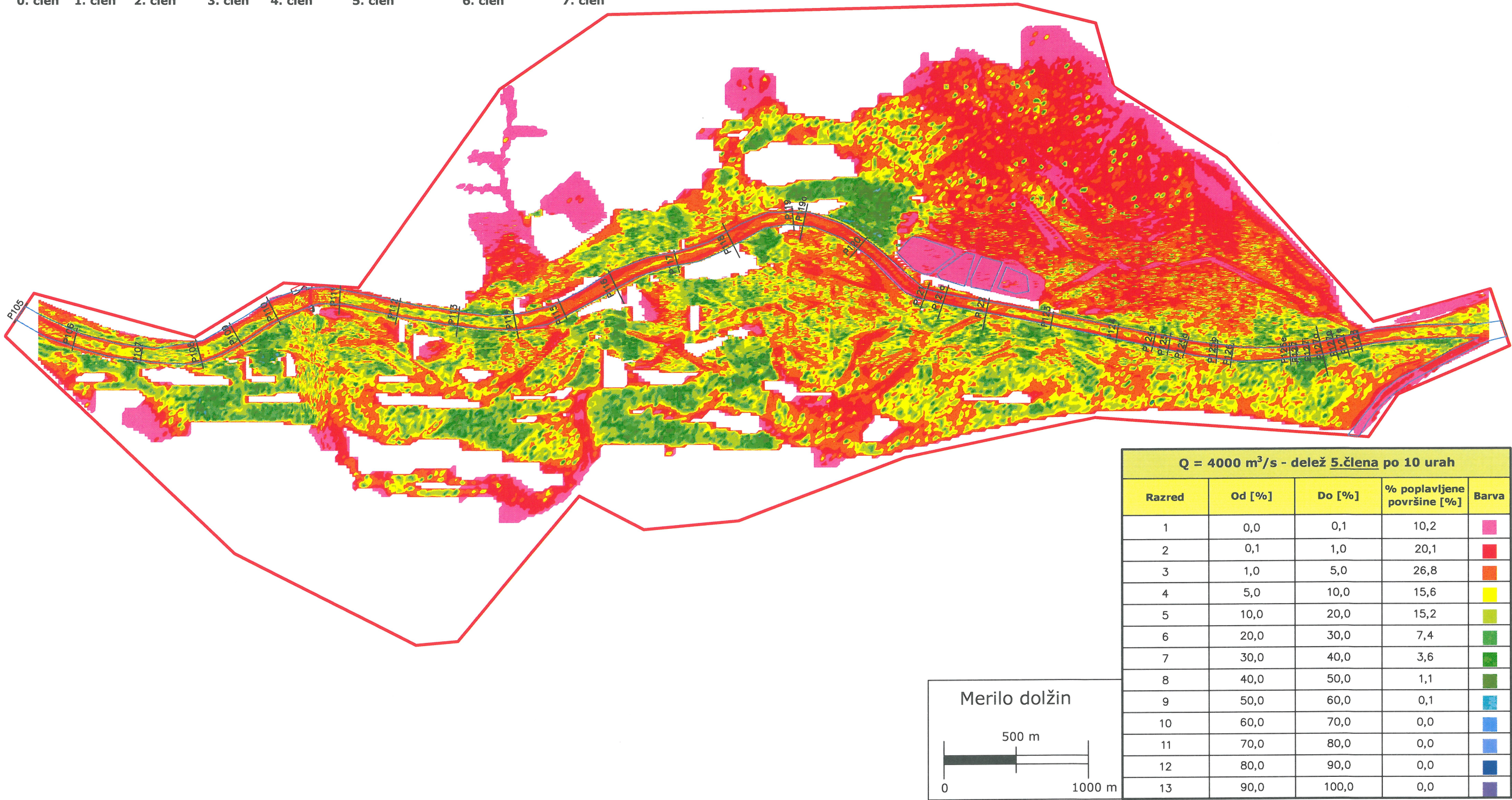
Q = 4000 m³/s - delež 4.člena po 10 urah				
Razred	Od [%]	Do [%]	% poplavljene površine [%]	Barva
1	0,0	0,1	0,0	
2	0,1	1,0	0,3	
3	1,0	5,0	1,4	
4	5,0	10,0	2,3	
5	10,0	20,0	7,0	
6	20,0	30,0	11,2	
7	30,0	40,0	19,6	
8	40,0	50,0	56,7	
9	50,0	60,0	1,2	
10	60,0	70,0	0,1	
11	70,0	80,0	0,0	
12	80,0	90,0	0,0	
13	90,0	100,0	0,0	

PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.14: Vpliv 4. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za y smer (~v smeri toka)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial y} - gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_g^2\frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

0. člen1. člen2. člen3. člen4. člen5. člen6. člen7. člen



PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.15: Vpliv 5. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

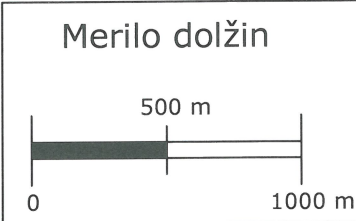
Dinamična enačba za y smer (∼v smeri toka)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial y} - gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_s^2\frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_i\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_i\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

0. člen1. člen2. člen3. člen4. člen5. člen6. člen7. člen



Q = 4000 m³/s - delež 6.člena po 10 urah				
Razred	Od [%]	Do [%]	% poplavljene površine [%]	Barva
1	0,0	0,1	99,0	
2	0,1	1,0	1,0	
3	1,0	5,0	0,0	
4	5,0	10,0	0,0	
5	10,0	20,0	0,0	
6	20,0	30,0	0,0	
7	30,0	40,0	0,0	
8	40,0	50,0	0,0	
9	50,0	60,0	0,0	
10	60,0	70,0	0,0	
11	70,0	80,0	0,0	
12	80,0	90,0	0,0	
13	90,0	100,0	0,0	

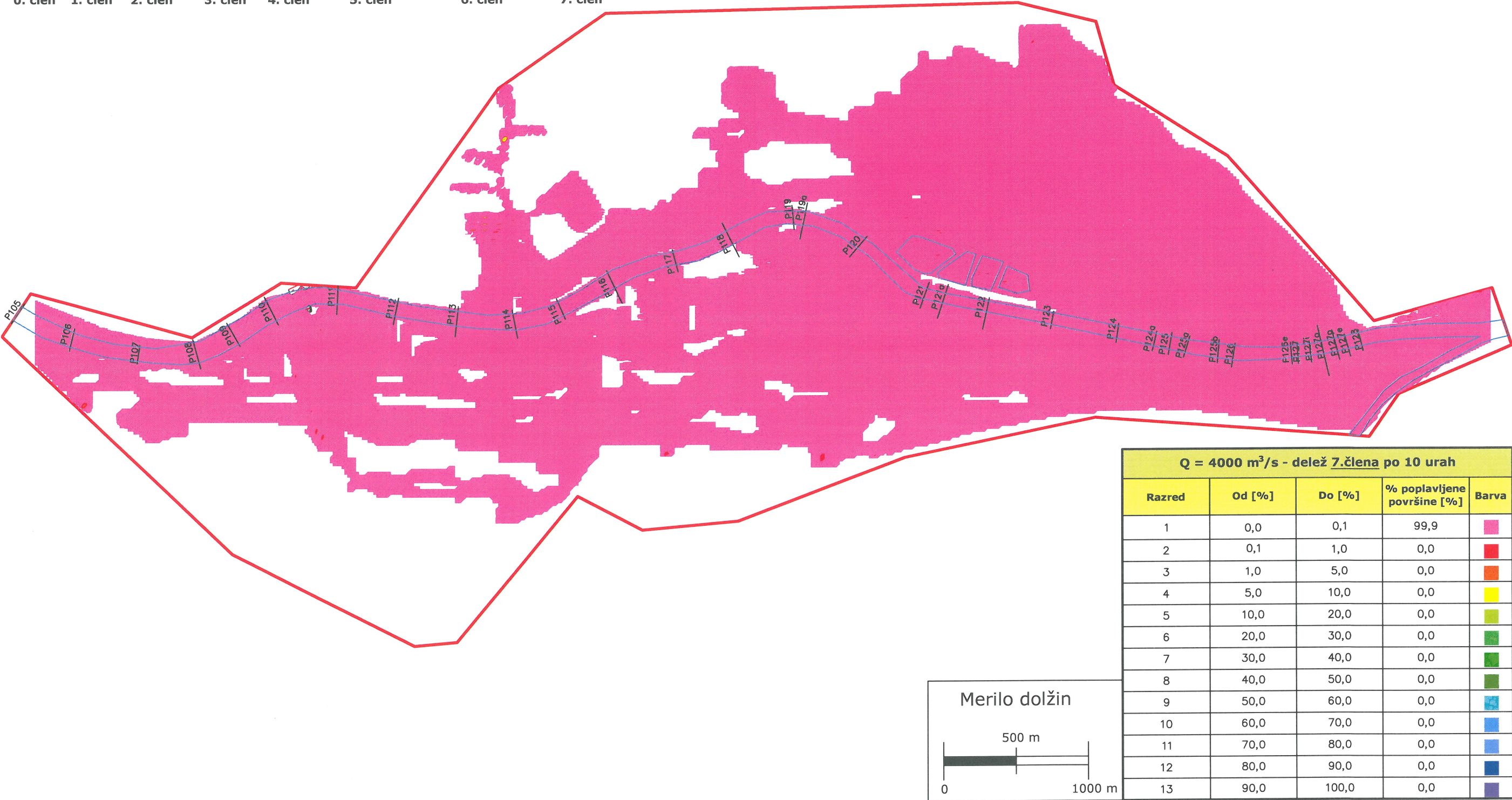


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.16: Vpliv 6. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za y smer (~v smeri toka)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial y} - gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn_g^2\frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen

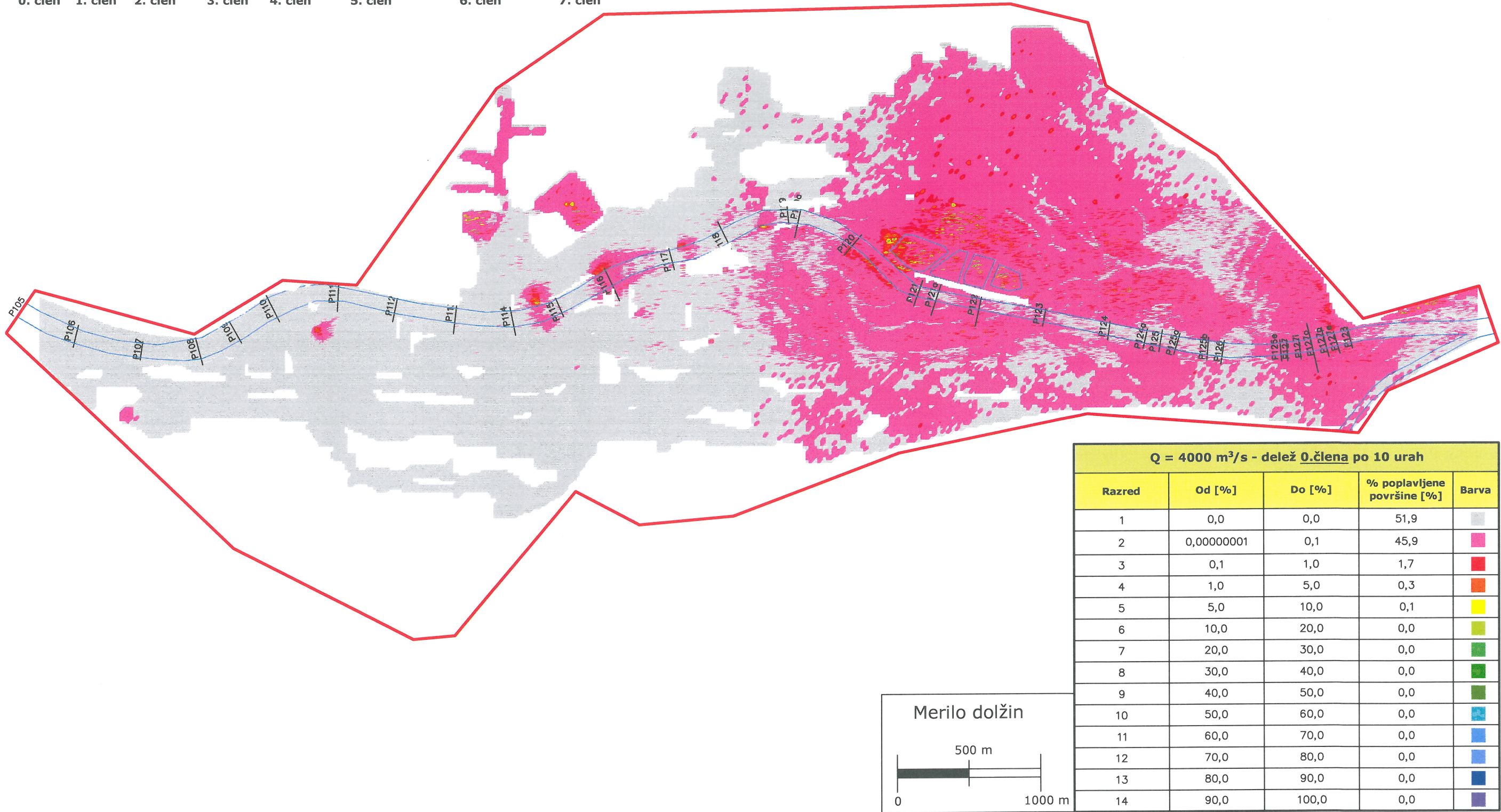


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.17: Vpliv 7. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za x smer (~pravokotno na smer toka)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn_g^2\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen

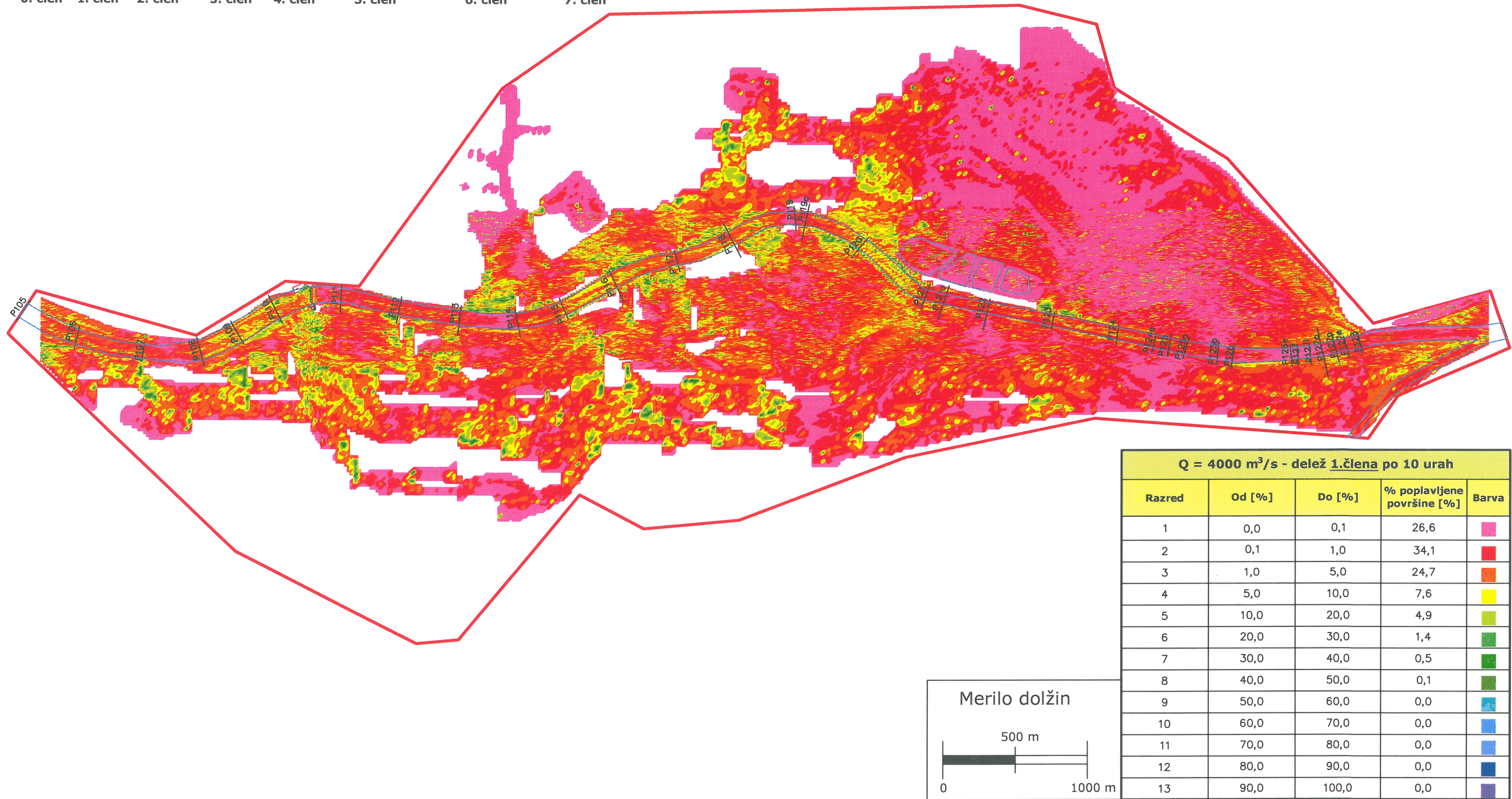


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.18: Vpliv 0. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za x smer (~pravokotno na smer toka)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn_g^2\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen

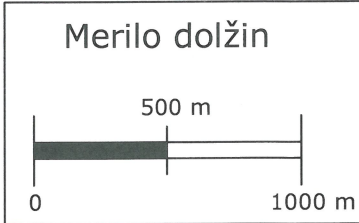
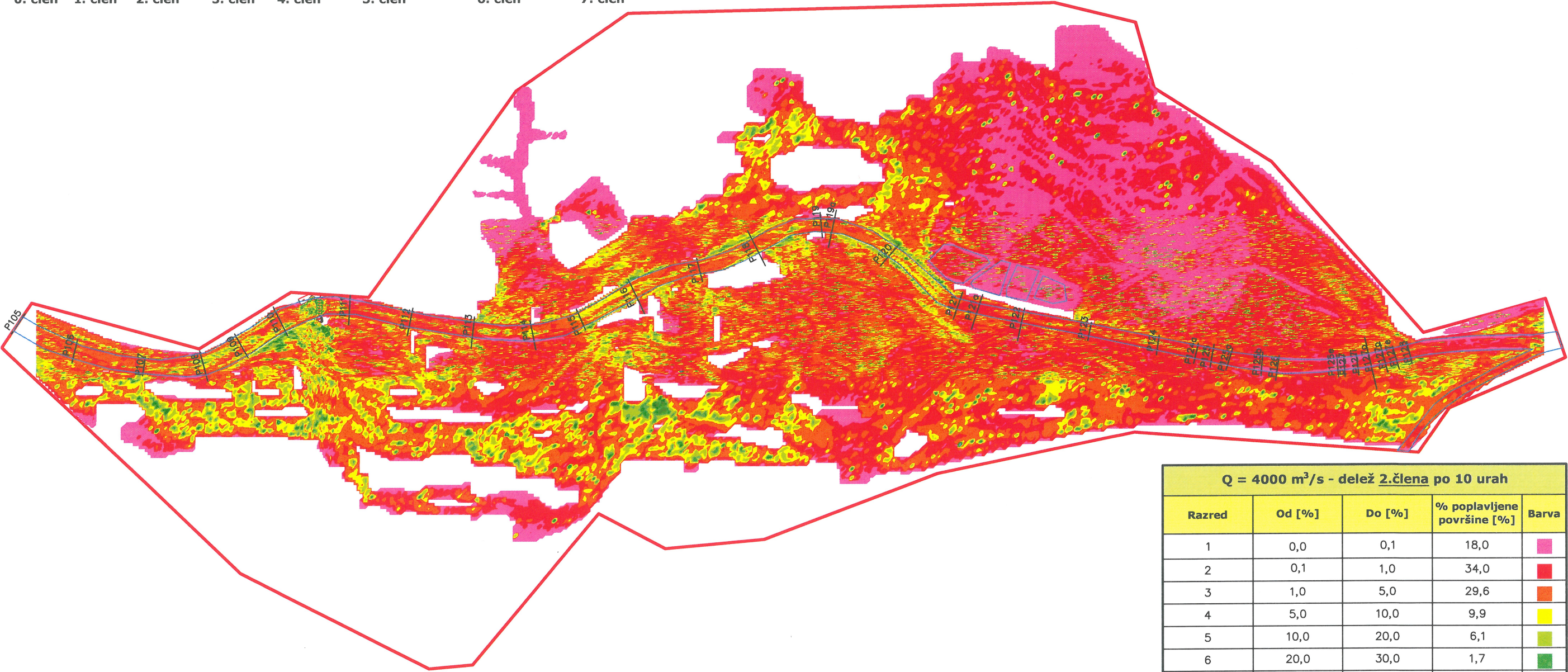


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.19: Vpliv 1. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za x smer (~pravokotno na smer toka)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn_g^2\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen



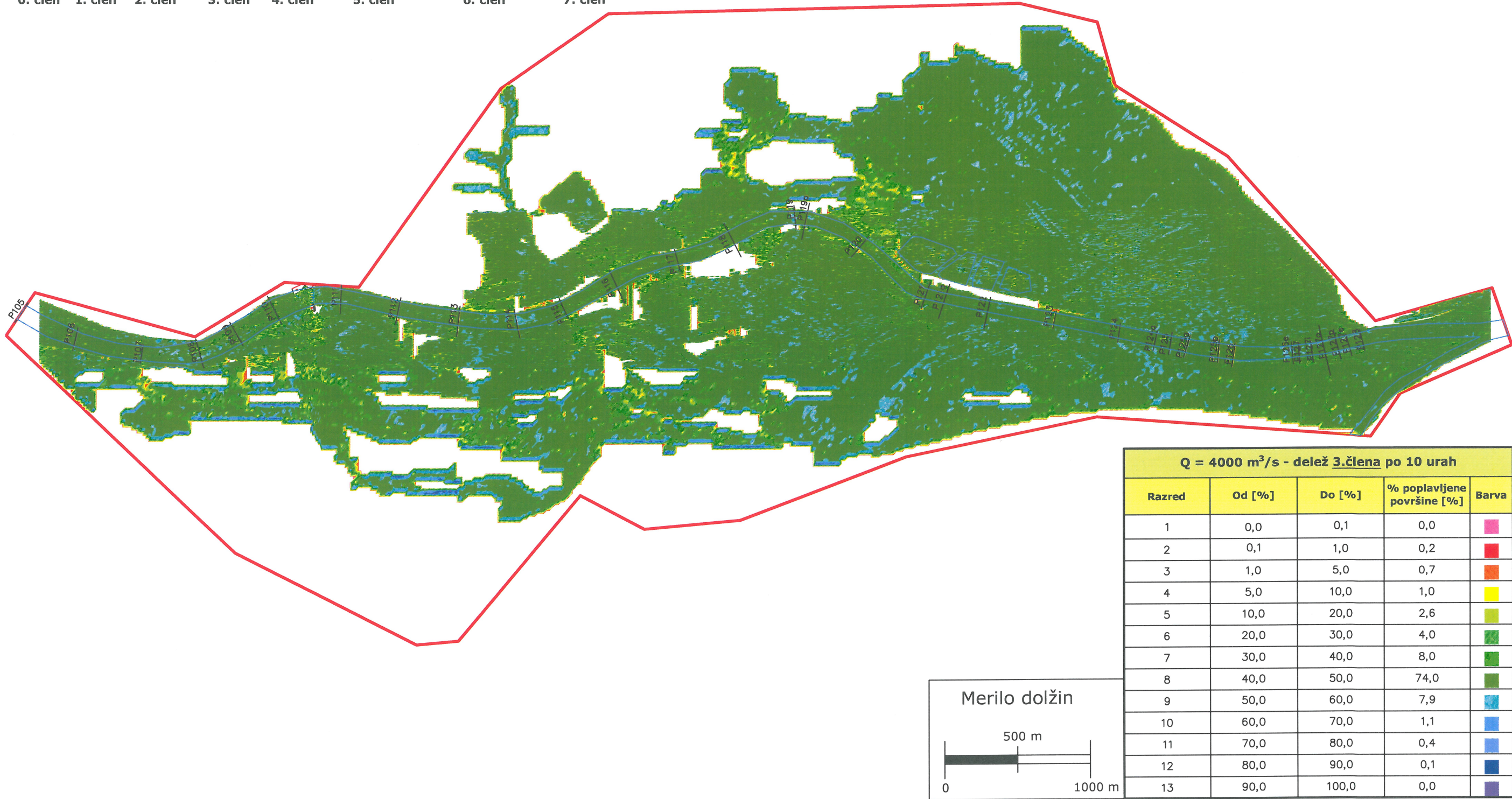
Q = 4000 m³/s - delež 2.člena po 10 urah				
Razred	Od [%]	Do [%]	% poplavljene površine [%]	Barva
1	0,0	0,1	18,0	
2	0,1	1,0	34,0	
3	1,0	5,0	29,6	
4	5,0	10,0	9,9	
5	10,0	20,0	6,1	
6	20,0	30,0	1,7	
7	30,0	40,0	0,5	
8	40,0	50,0	0,1	
9	50,0	60,0	0,0	
10	60,0	70,0	0,0	
11	70,0	80,0	0,0	
12	80,0	90,0	0,0	
13	90,0	100,0	0,0	

PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.20: Vpliv 2. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za x smer (~pravokotno na smer toka)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn_g^2\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen



PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.21: Vpliv 3. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

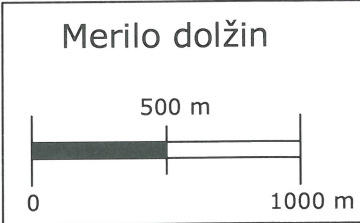
Dinamična enačba za x smer (~pravokotno na smer toka)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn_g^2\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen



Q = 4000 m³/s - delež 4.člena po 10 urah				
Razred	Od [%]	Do [%]	% poplavljene površine [%]	Barva
1	0,0	0,1	0,0	
2	0,1	1,0	0,3	
3	1,0	5,0	1,3	
4	5,0	10,0	1,7	
5	10,0	20,0	4,1	
6	20,0	30,0	5,6	
7	30,0	40,0	9,6	
8	40,0	50,0	73,5	
9	50,0	60,0	3,7	
10	60,0	70,0	0,1	
11	70,0	80,0	0,0	
12	80,0	90,0	0,0	
13	90,0	100,0	0,0	

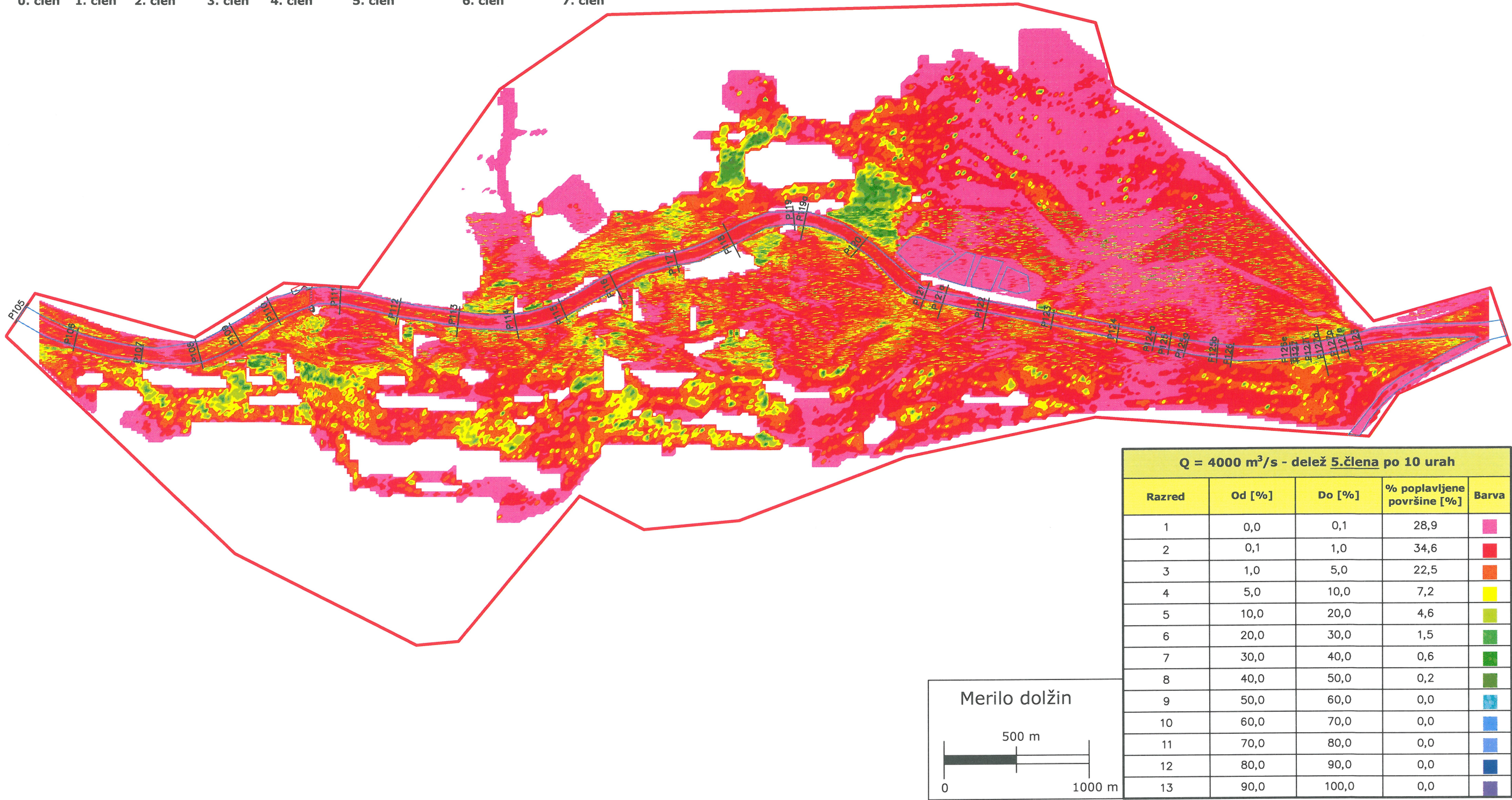


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.22: Vpliv 4. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

Dinamična enačba za x smer (~pravokotno na smer toka)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn_g^2\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen

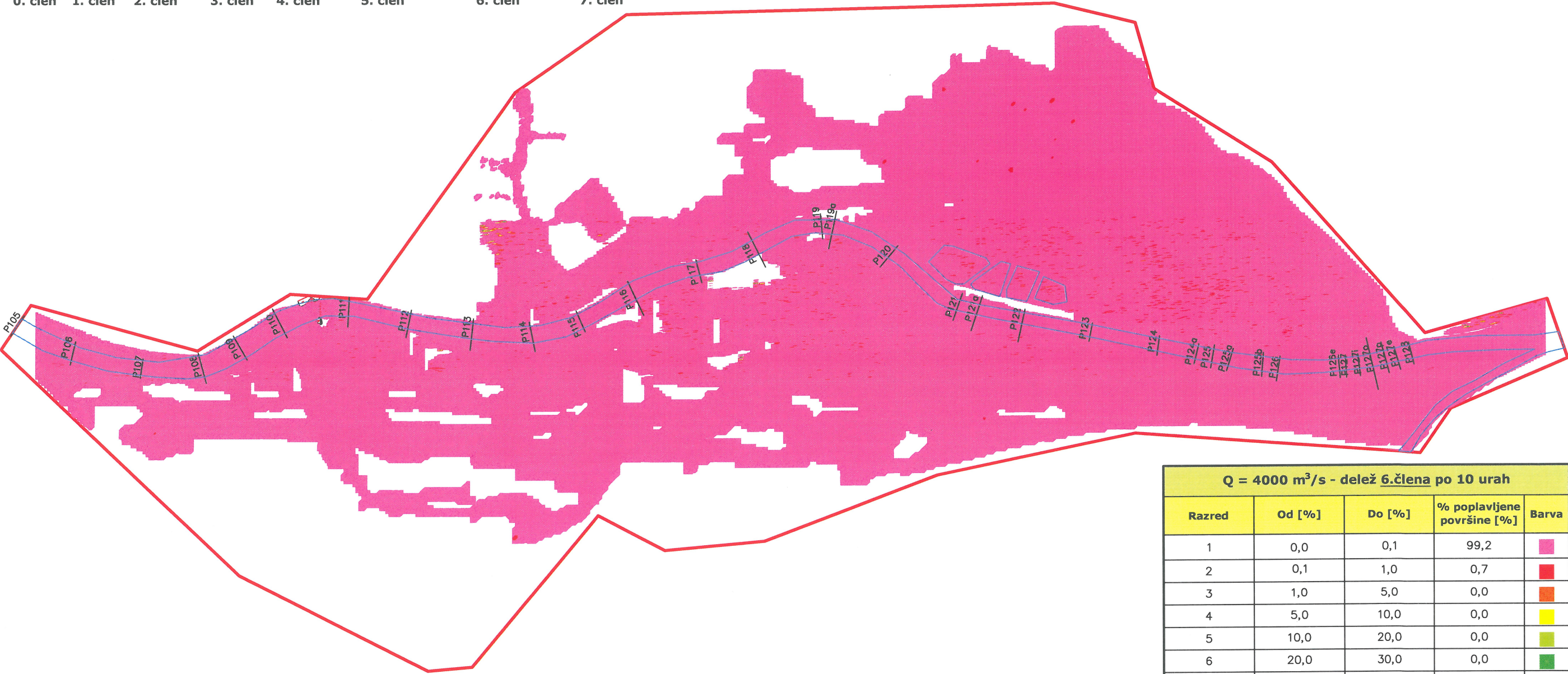


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.23: Vpliv 5. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

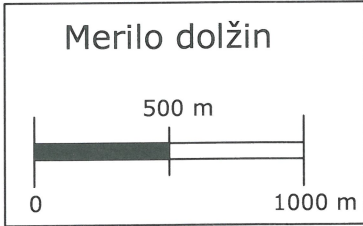
Dinamična enačba za x smer (~pravokotno na smer toka)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn_s^2\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen



Q = 4000 m³/s - delež 6.člena po 10 urah				
Razred	Od [%]	Do [%]	% poplavljene površine [%]	Barva
1	0,0	0,1	99,2	
2	0,1	1,0	0,7	
3	1,0	5,0	0,0	
4	5,0	10,0	0,0	
5	10,0	20,0	0,0	
6	20,0	30,0	0,0	
7	30,0	40,0	0,0	
8	40,0	50,0	0,0	
9	50,0	60,0	0,0	
10	60,0	70,0	0,0	
11	70,0	80,0	0,0	
12	80,0	90,0	0,0	
13	90,0	100,0	0,0	

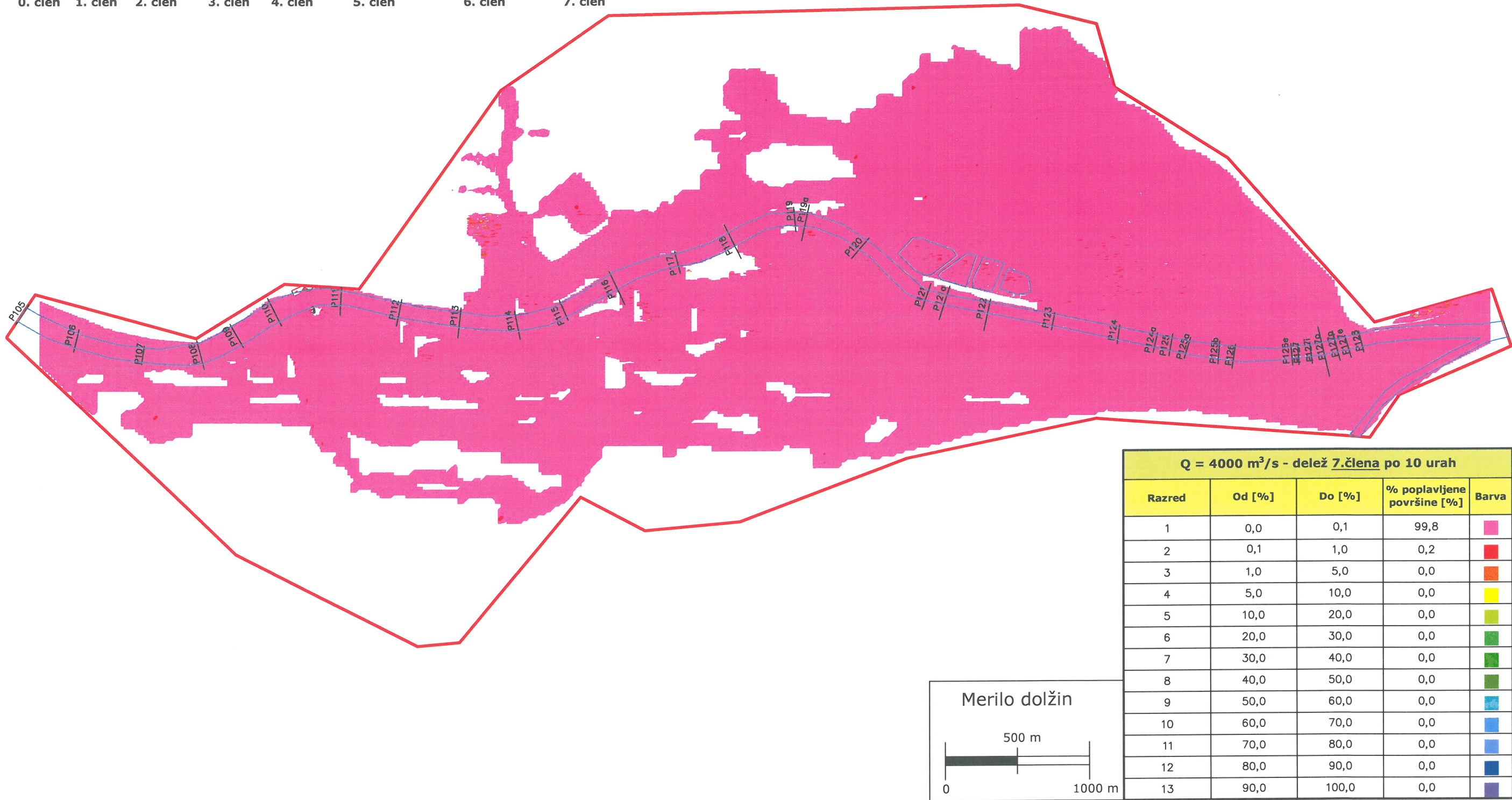


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.24: Vpliv 6. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.

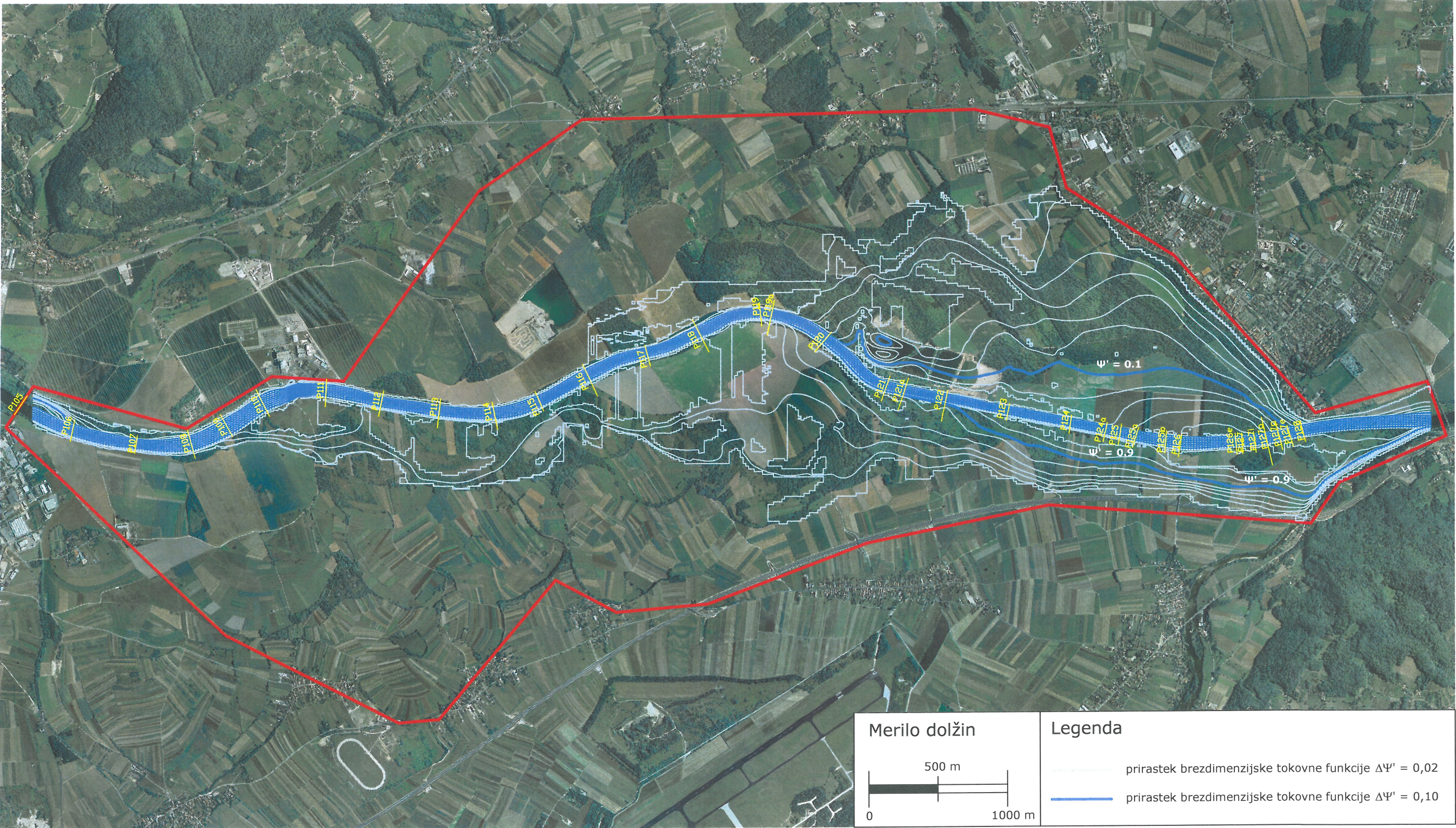
Dinamična enačba za x smer (~pravokotno na smer toka)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial h}{\partial x} - gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn_g^2\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv_t\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

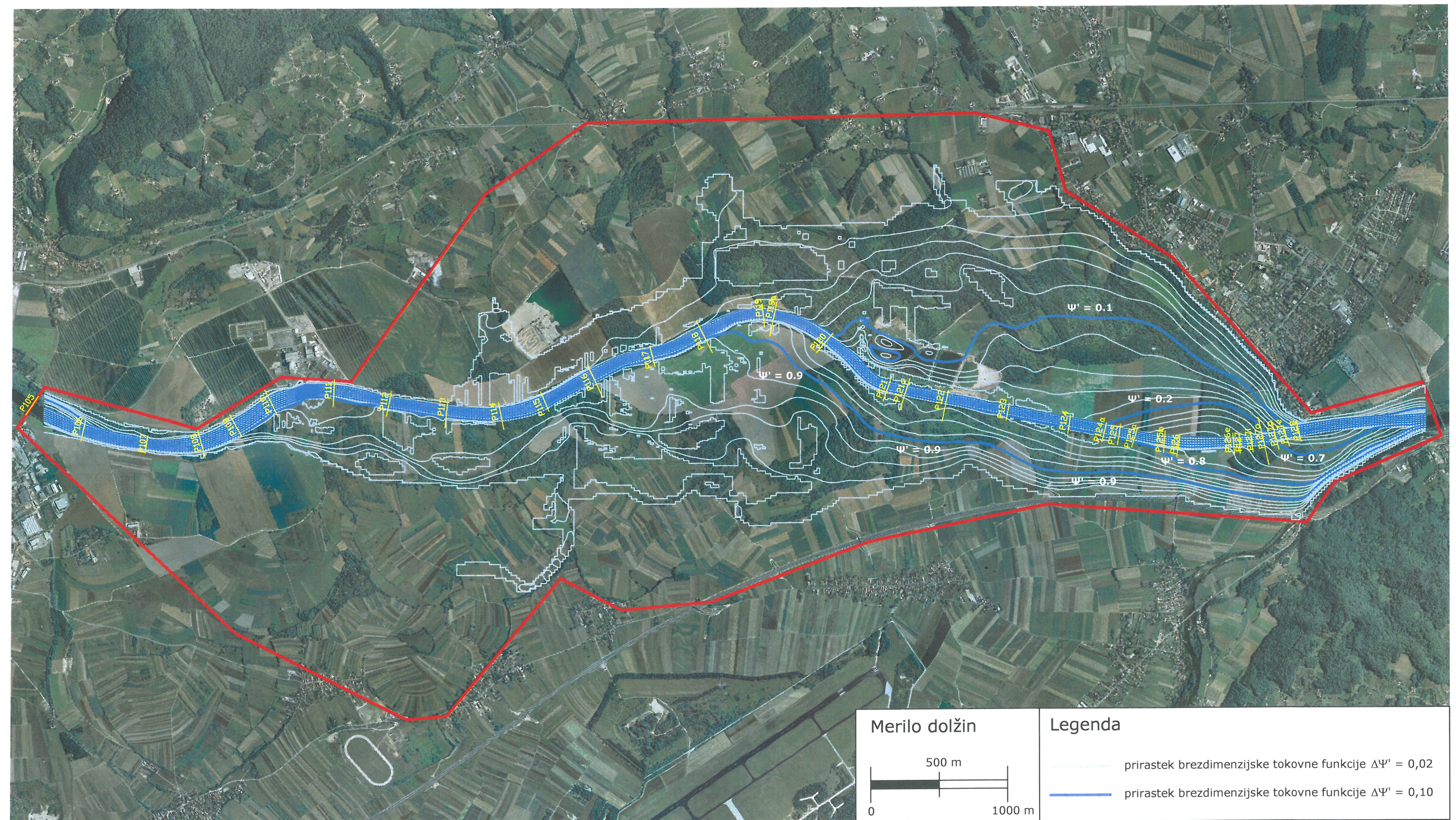
0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen



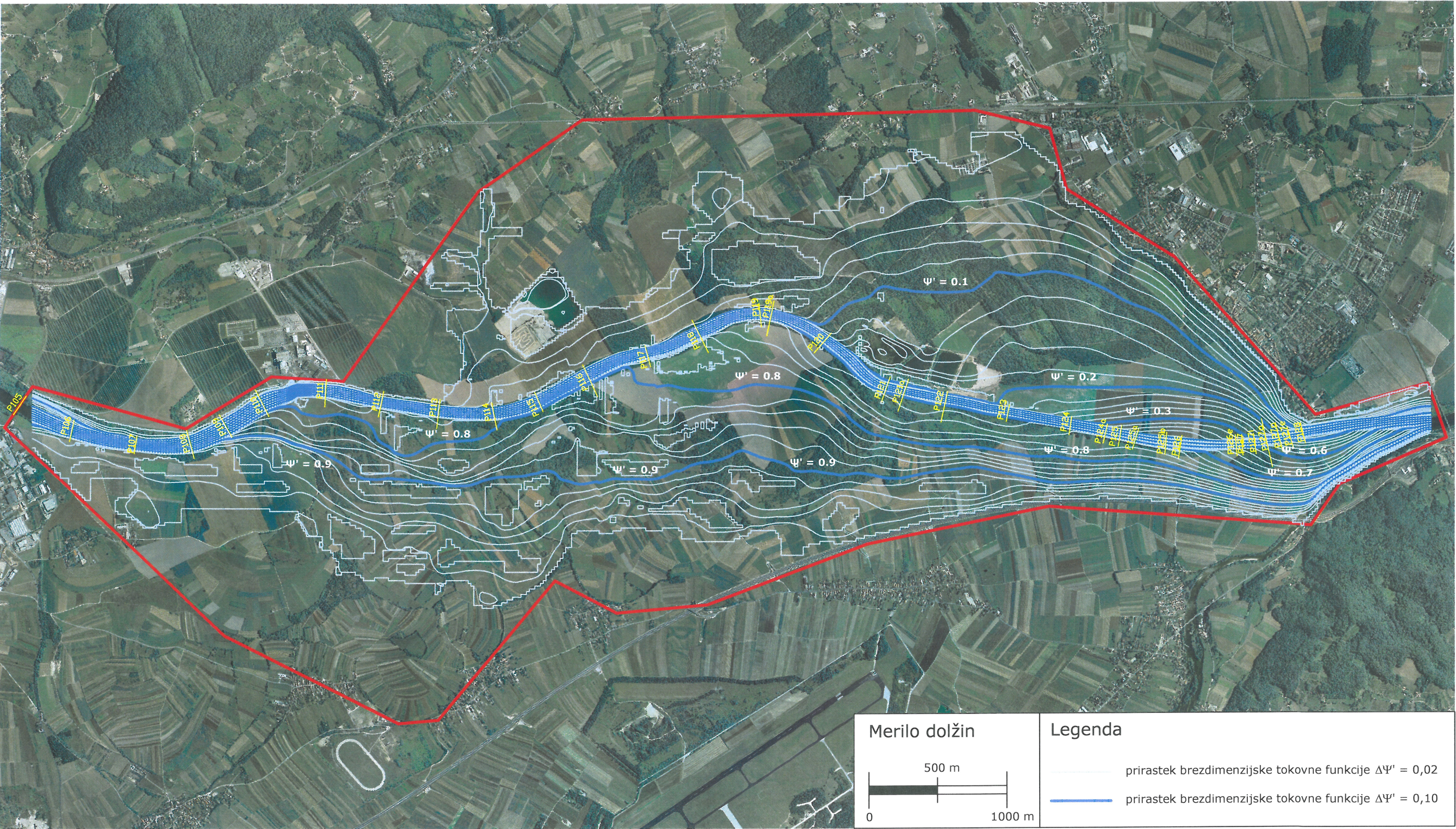
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.25: Vpliv 7. člena v dinamični enačbi po 10 urah simulacije. Skupni pretok 4000 m³/s; model s konstantno vrednostjo koeficienta turbulentne viskoznosti $\nu_t = 0,010 \text{ m}^2/\text{s}$.



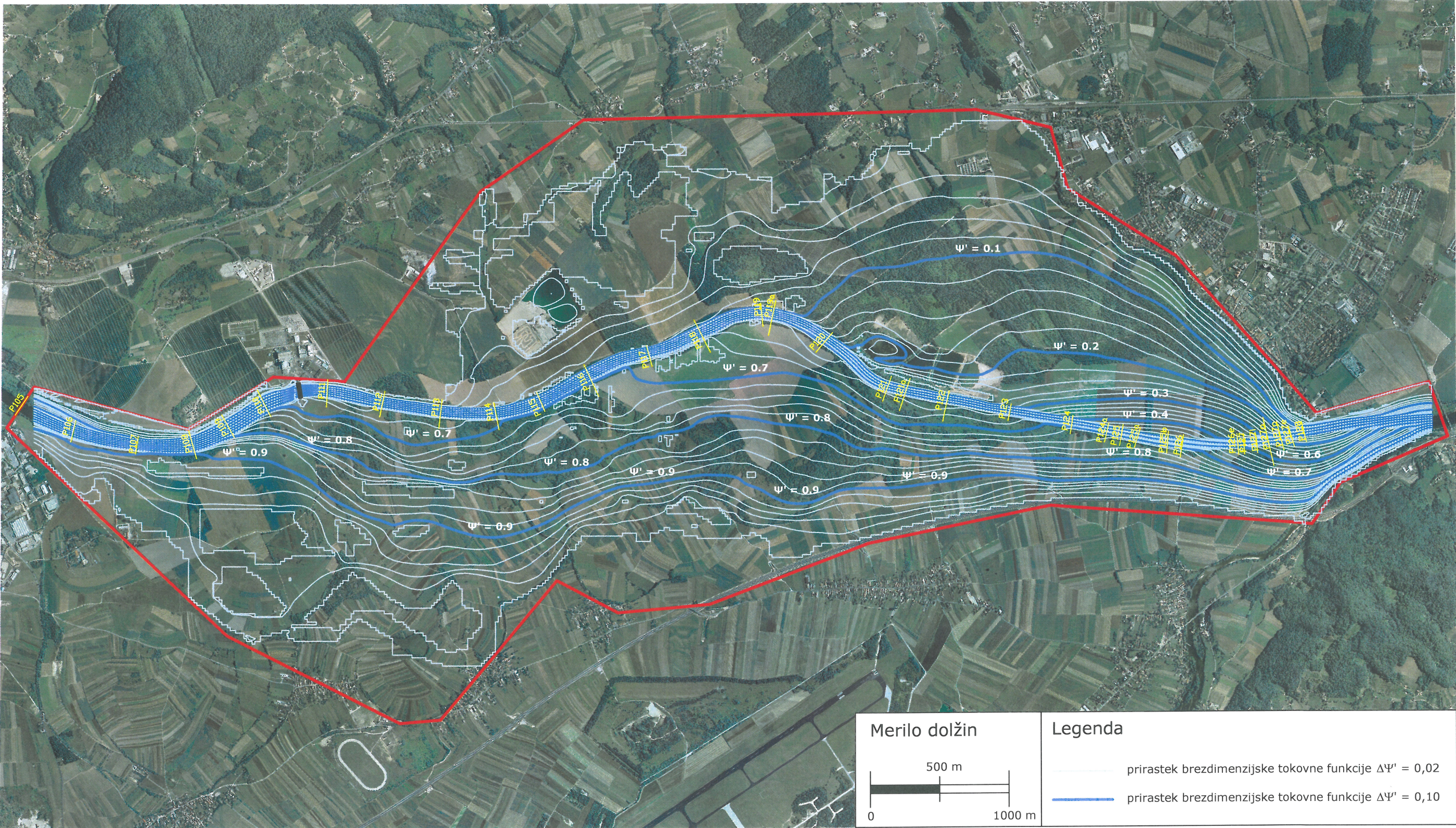
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.26: Tokovnice pri skupnem pretoku 2466 m³/s.



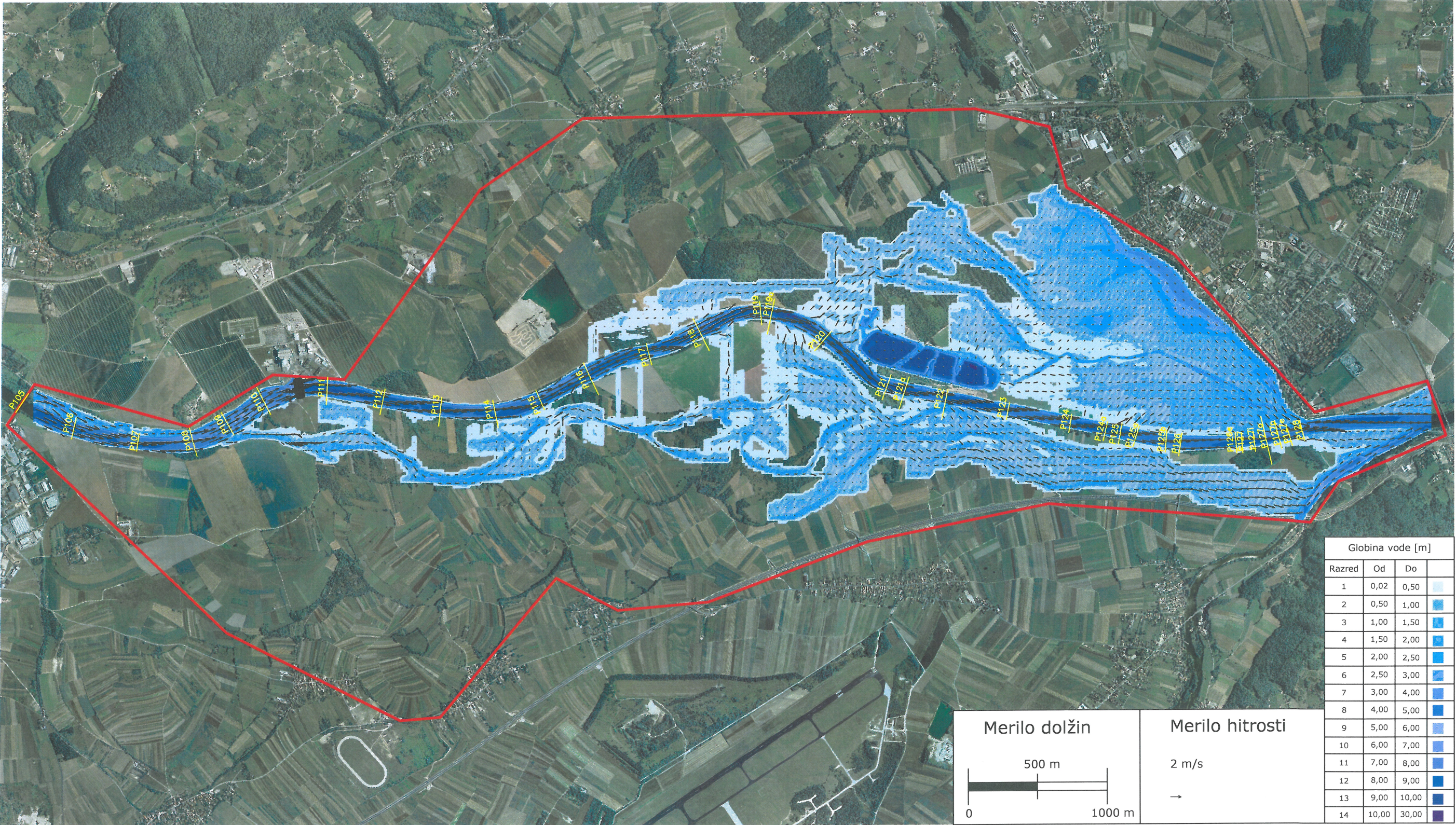
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.27: Tokovnice pri skupnem pretoku $3000 \text{ m}^3/\text{s}$.



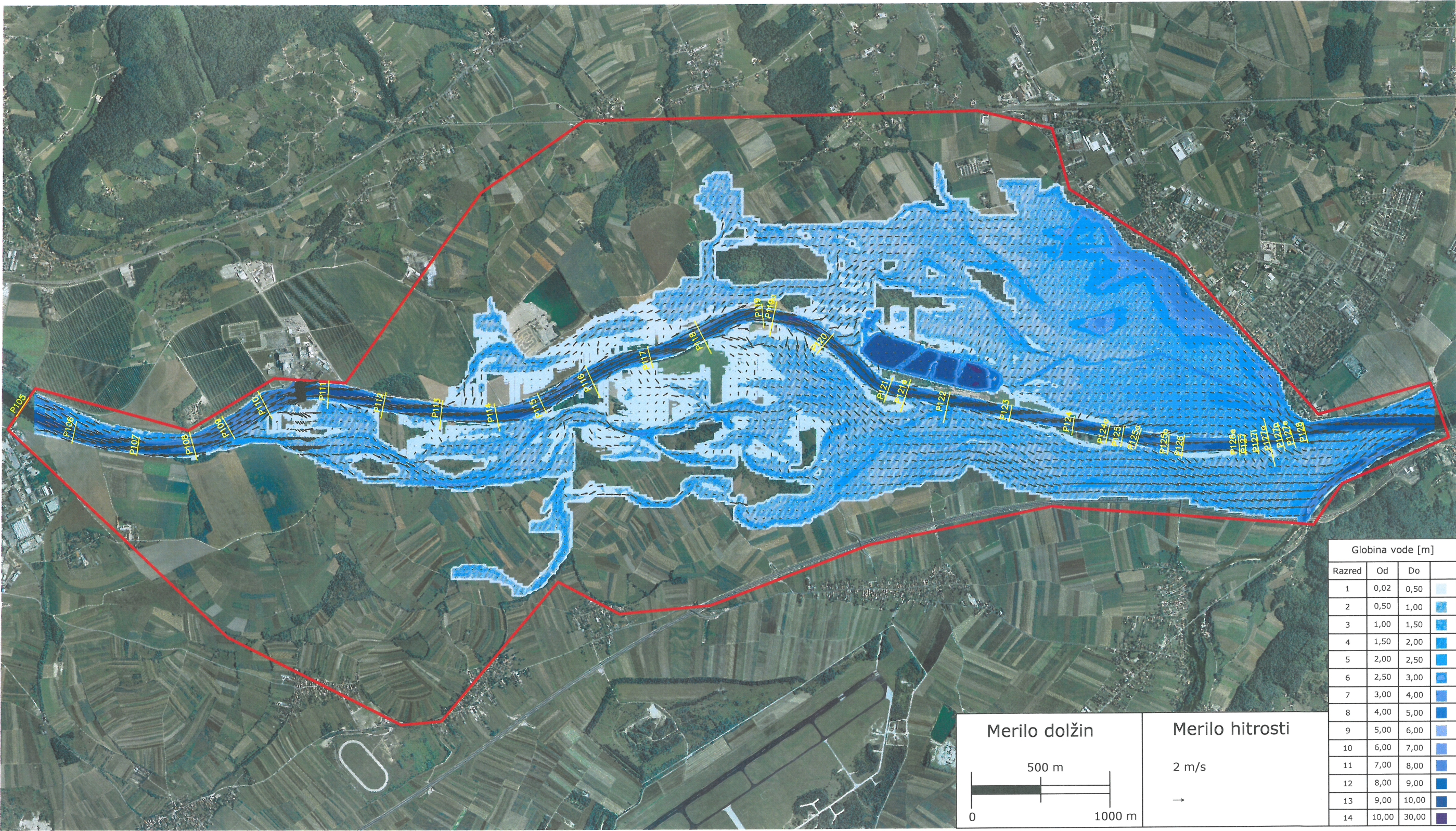
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.28: Tokovnice pri skupnem pretoku 4000 m³/s.



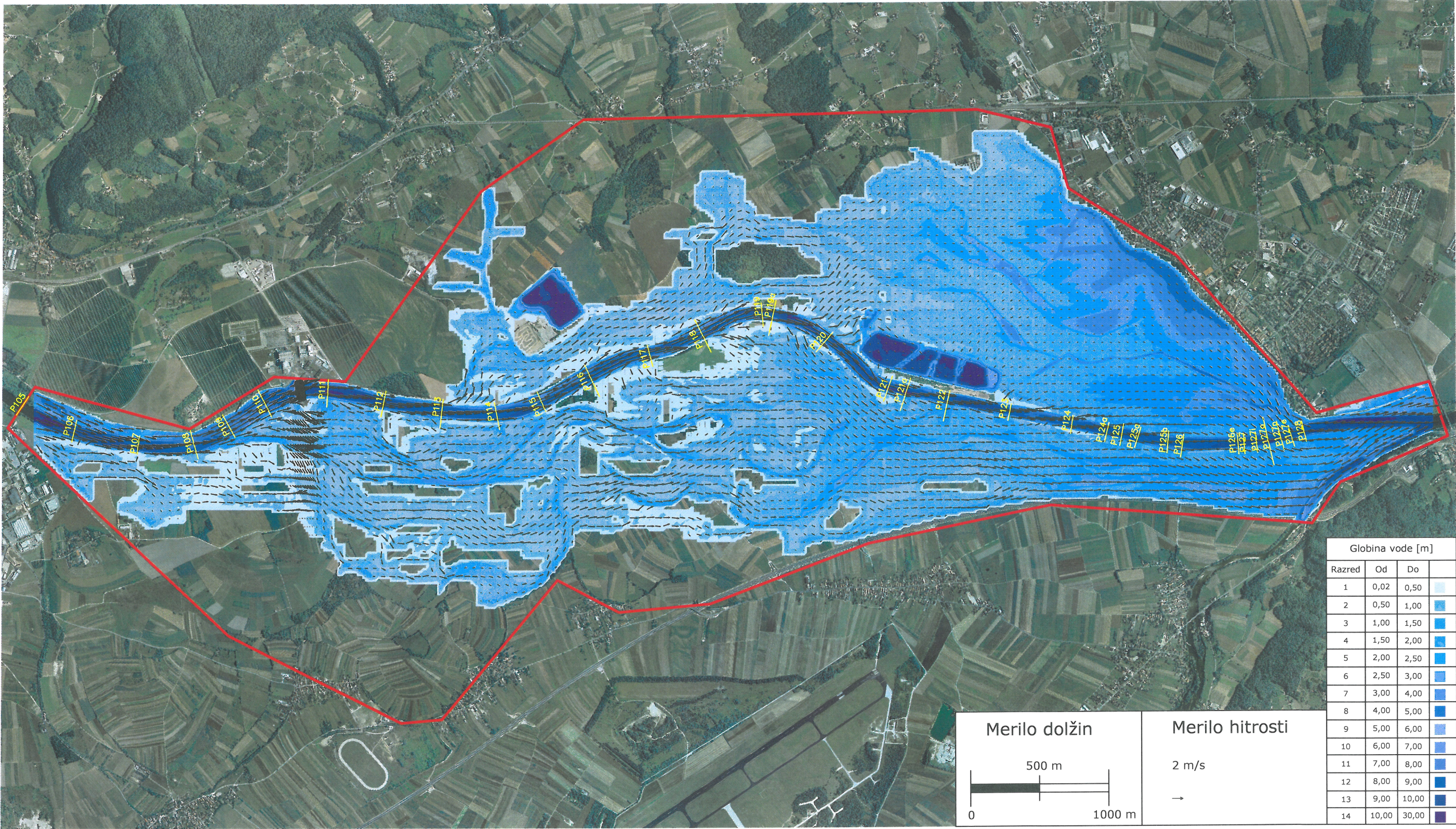
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.29: Tokovnice pri skupnem pretoku $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.



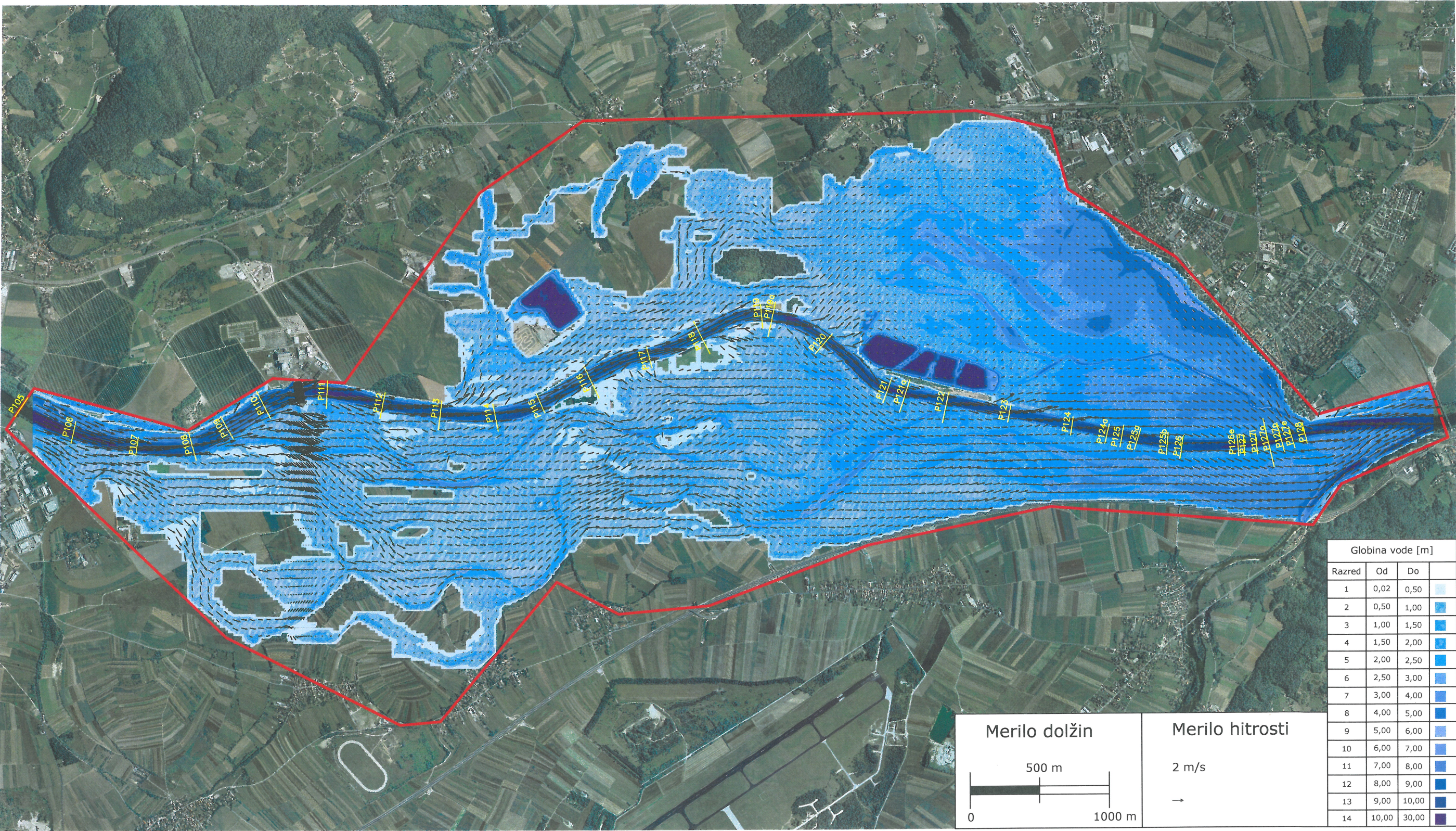
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.30: Obseg poplavljenosti s prikazom globin vode in vektorji hitrosti pri skupnem pretoku 2466 m³/s.



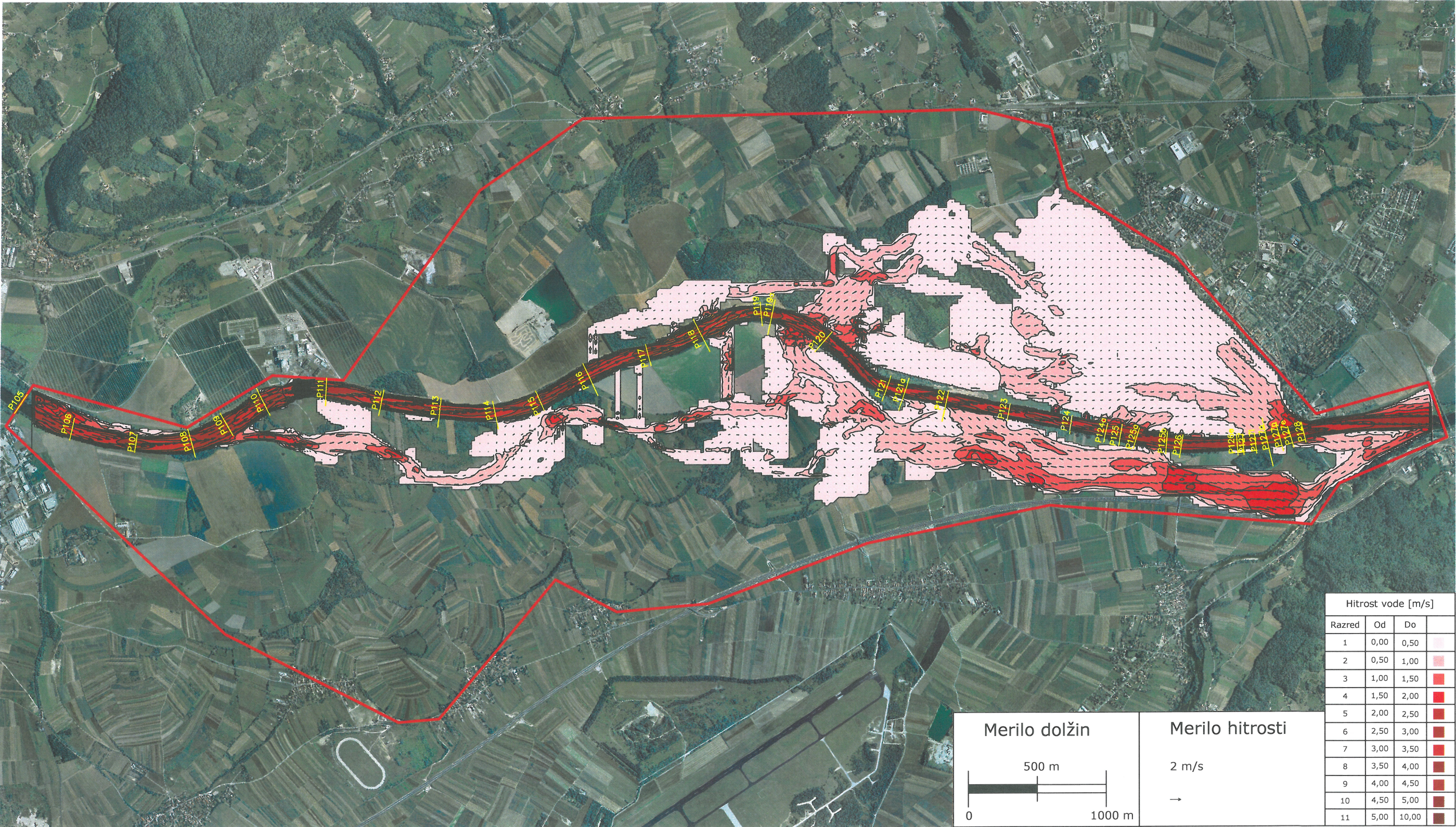
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.31: Obseg poplavljenosti s prikazom globin vode in vektorji hitrosti pri skupnem pretoku 3000 m³/s.



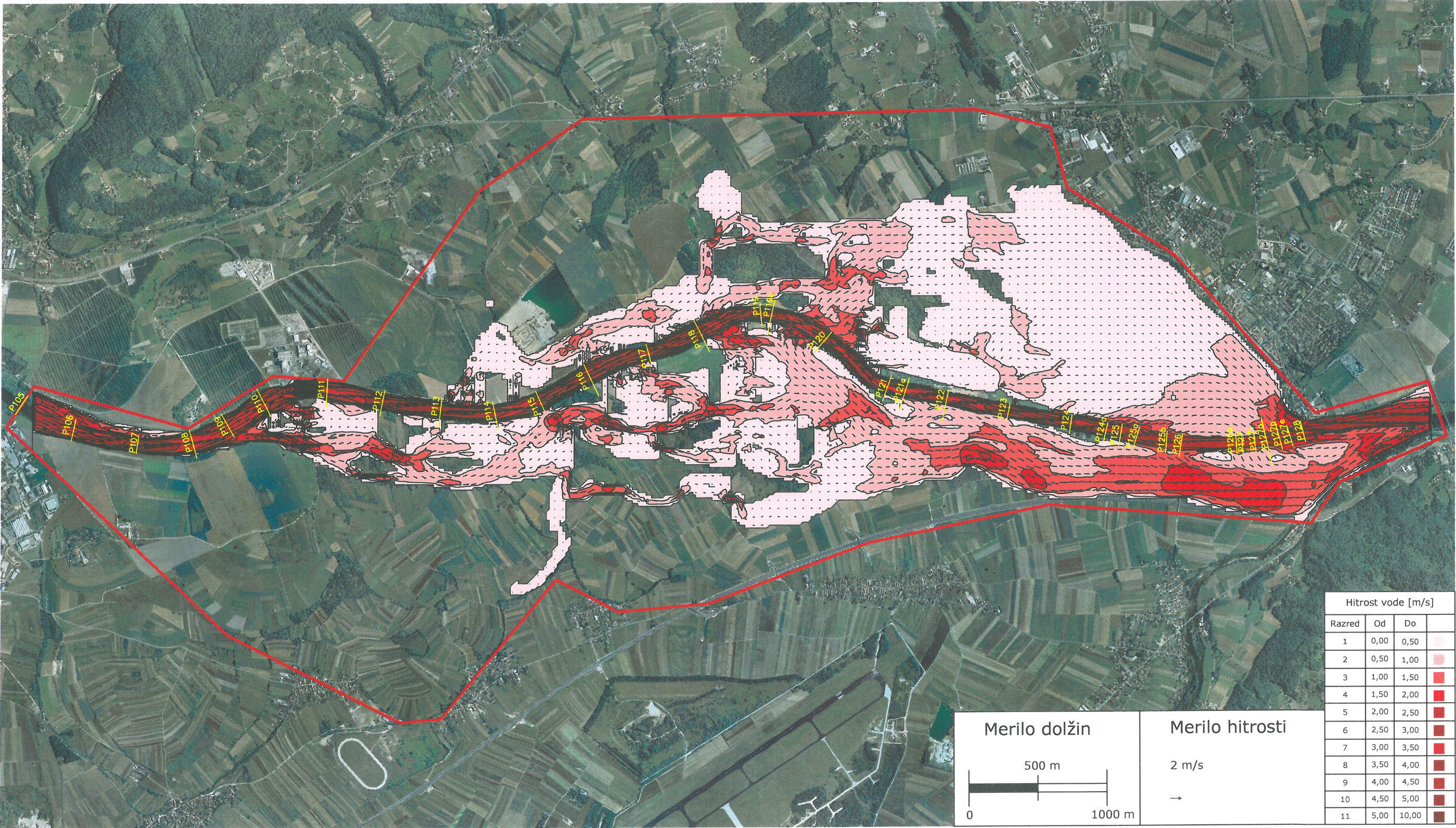
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.32: Obseg poplavljenosti s prikazom globin vode in vektorji hitrosti pri skupnem pretoku 4000 m³/s.



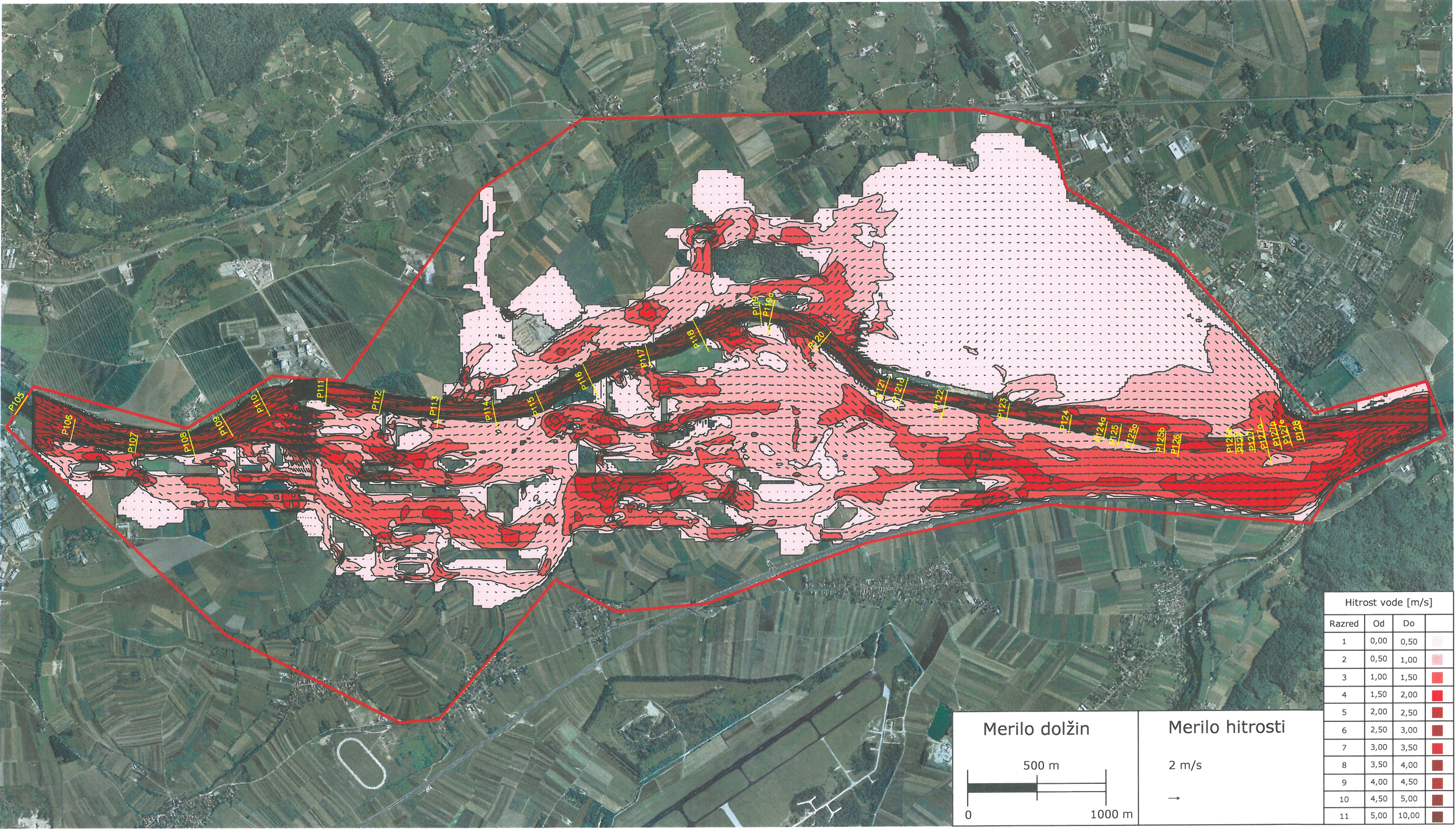
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.33: Obseg poplavljenosti s prikazom globin vode in vektorji hitrosti pri skupnem pretoku 5000 m³/s.



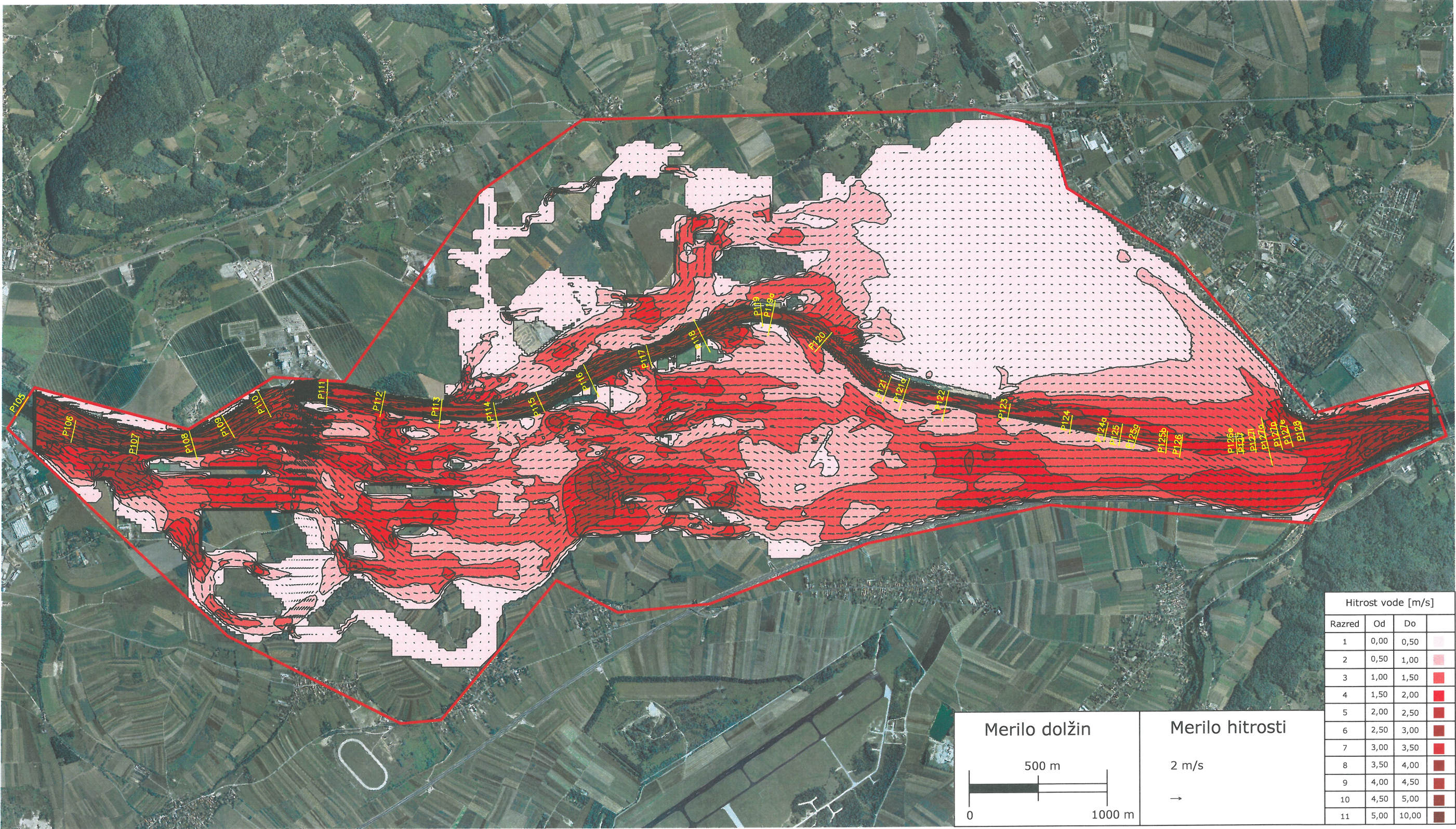
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.34: Izotahe pri skupnem pretoku 2466 m³/s.



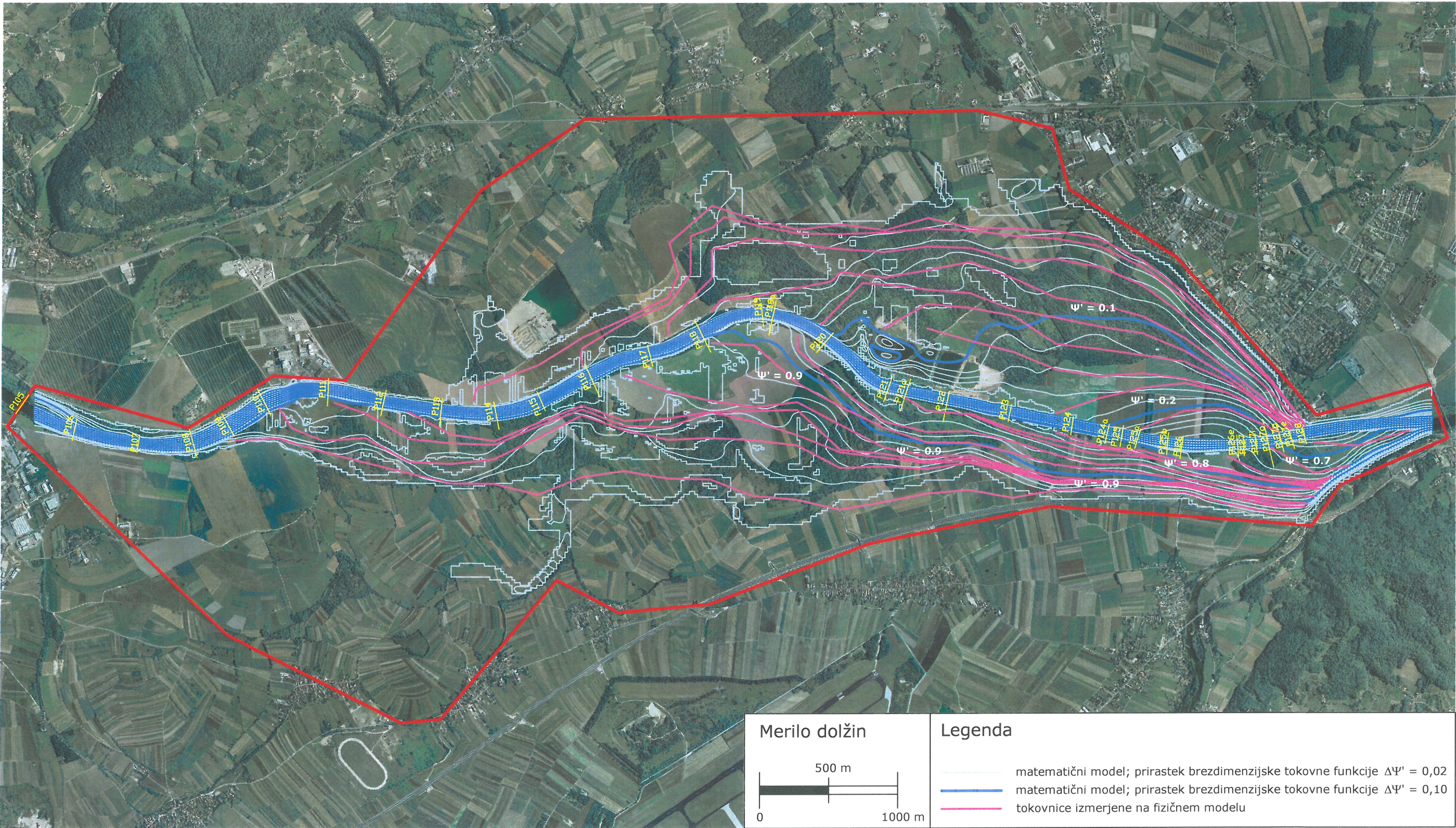
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.35: Izotahe pri skupnem pretoku 3000 m³/s.



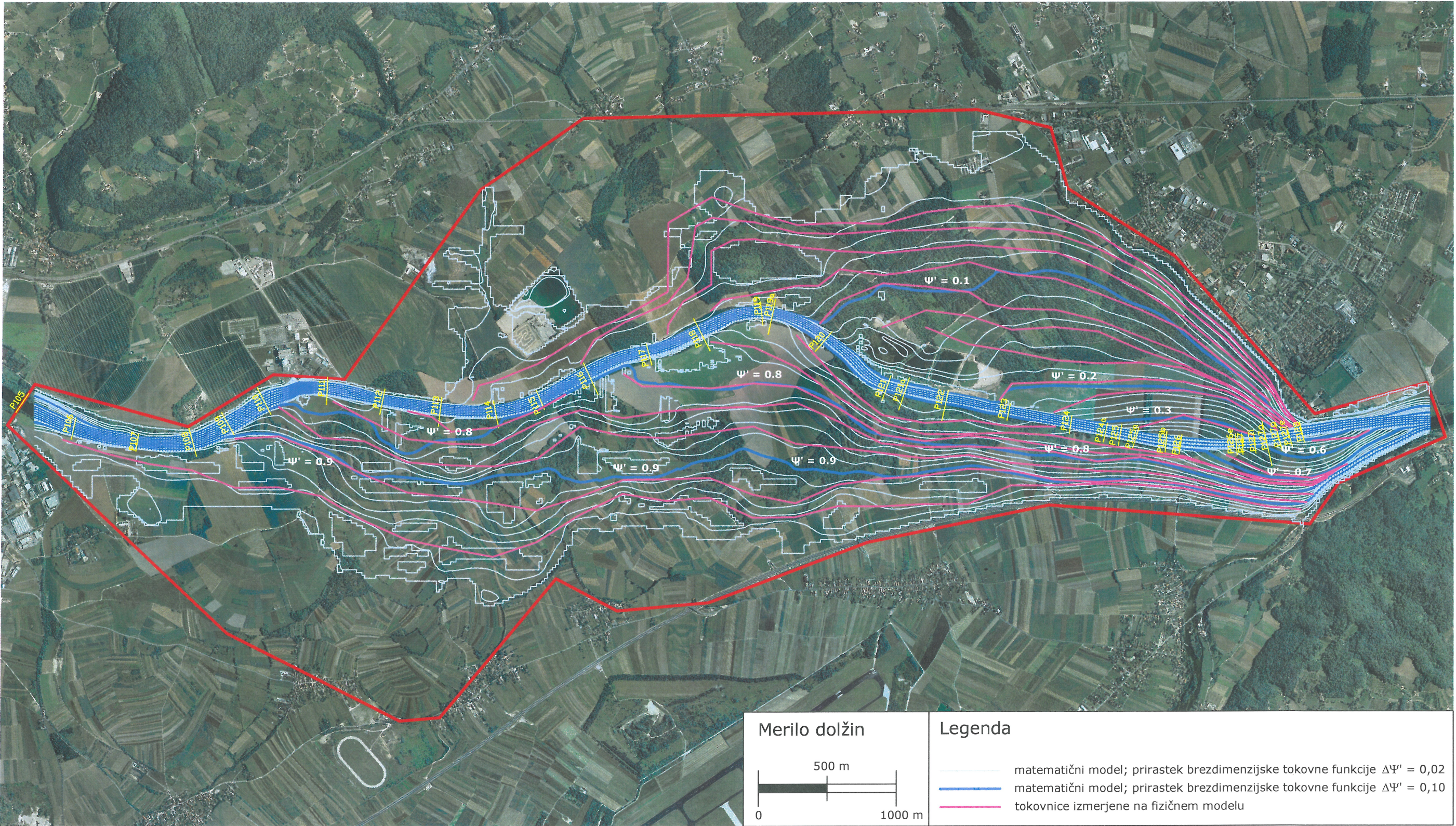
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.36: Izotahe pri skupnem pretoku 4000 m³/s.



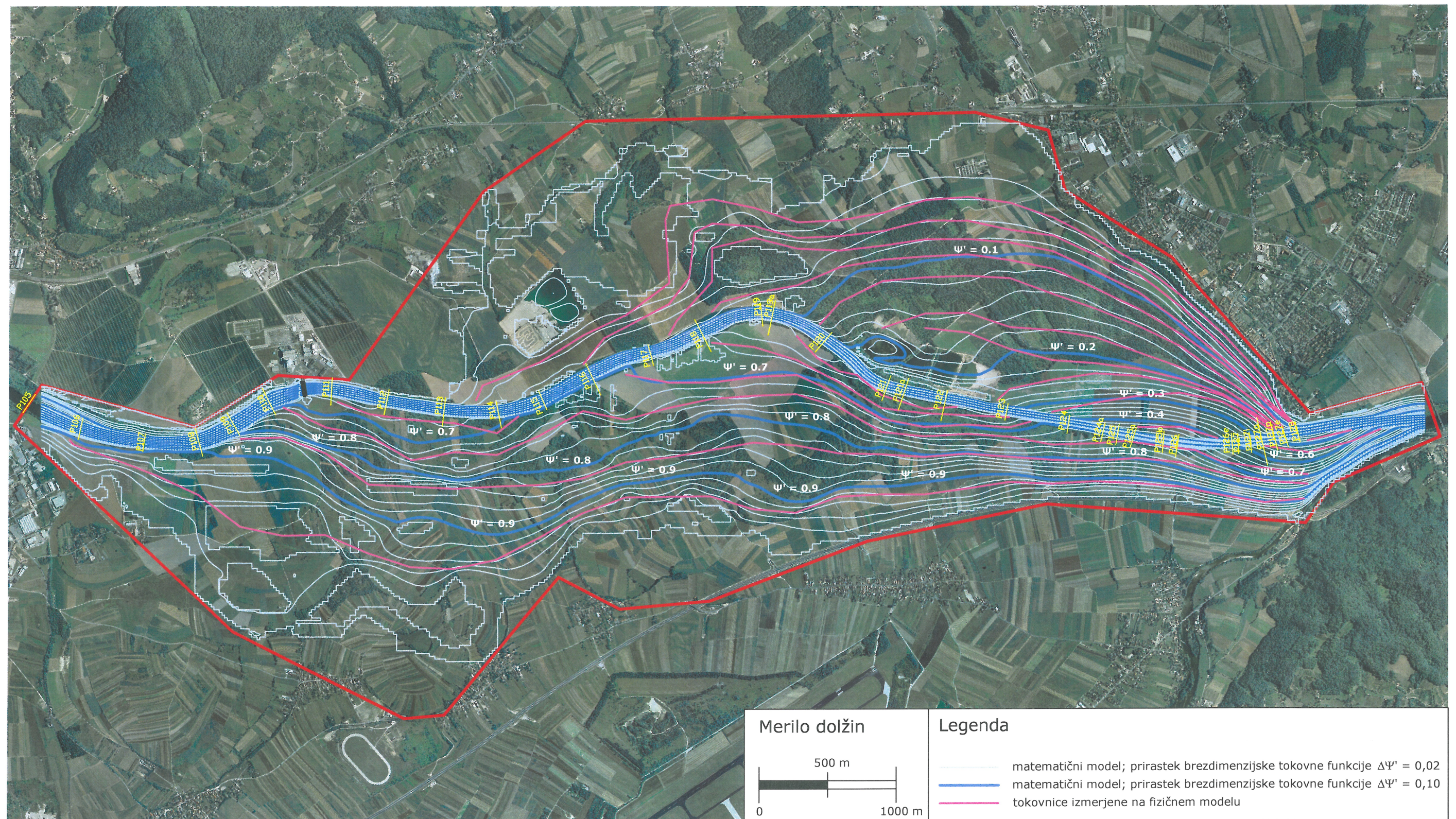
PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.37: Izotahe pri skupnem pretoku 5000 m³/s.



PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.38: Primerjava tokovnic dobljenih na matematičnem in fizičnem modelu pri skupnem pretoku 3000 m³/s.



PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.39: Primerjava tokovnic dobljenih na matematičnem in fizičnem modelu pri skupnem pretoku 4000 m³/s.

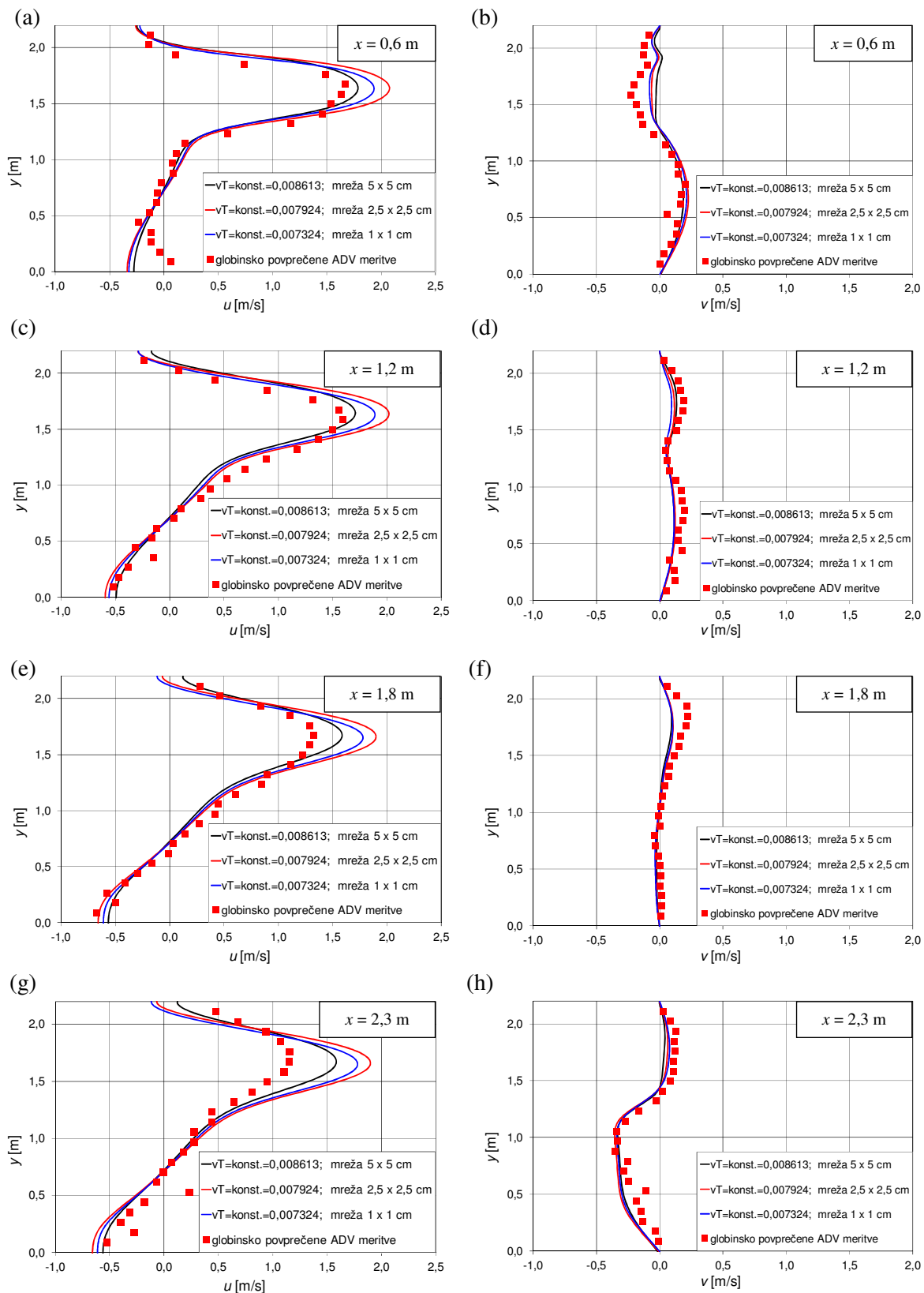


PRILOGA B: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA OBMOČJA HE BREŽICE
Priloga B.40: Primerjava tokovnic dobljenih na matematičnem in fizičnem modelu pri skupnem pretoku $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

PRILOGA C: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA RIBJE STEZE BLANCA

Priloga C.1: Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnih prerezih $x = 0,6, 1,2, 1,8$ and $2,3$ m.

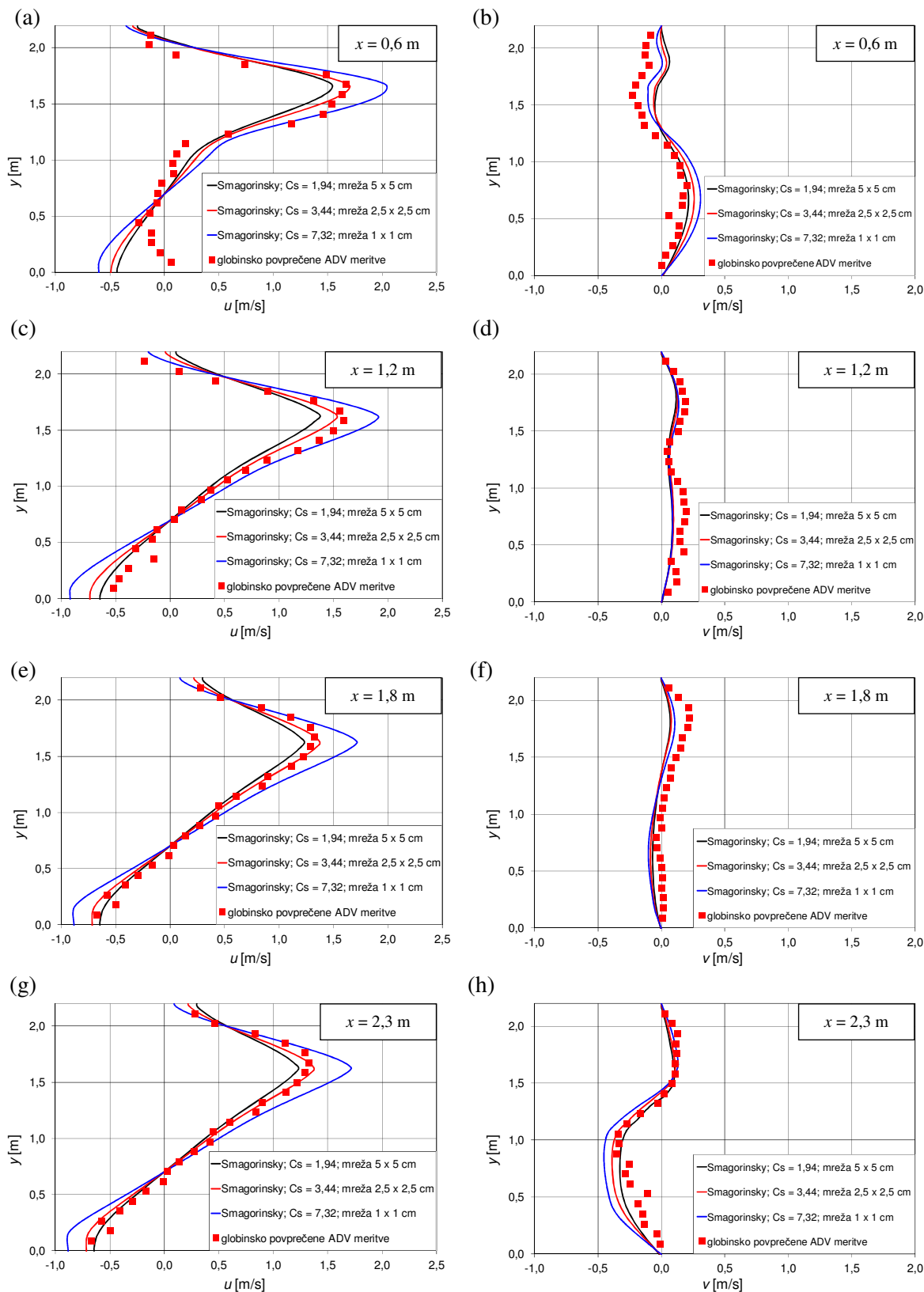
MODEL KONSTANTNE EFEKTIVNE VISKOZNOSTI



PRILOGA C: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA RIBJE STEZE BLANCA

Priloga C.2: Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnih prerezih $x = 0,6, 1,2, 1,8$ and $2,3$ m.

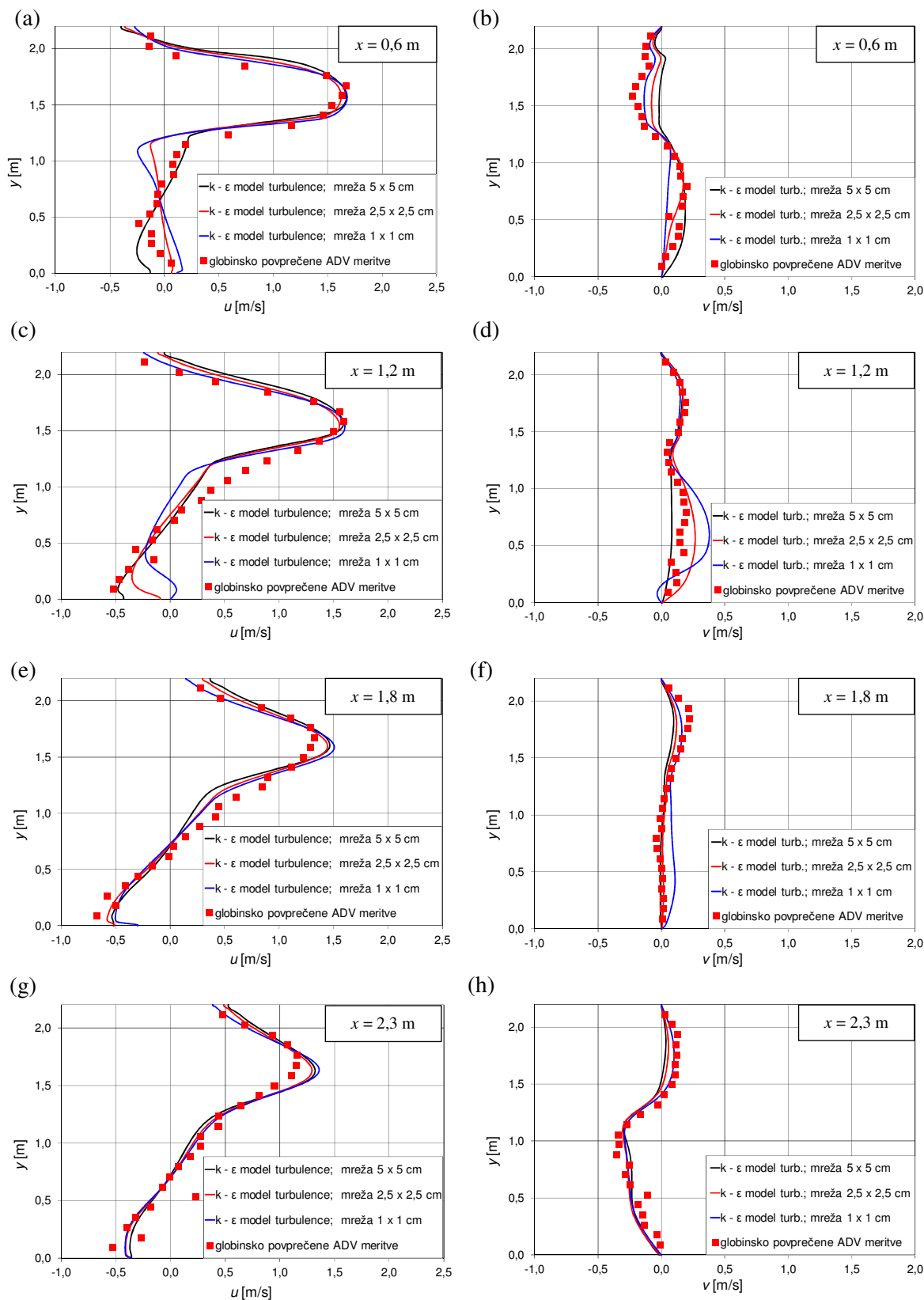
MODEL TURBULENCE SMAGORINSKY



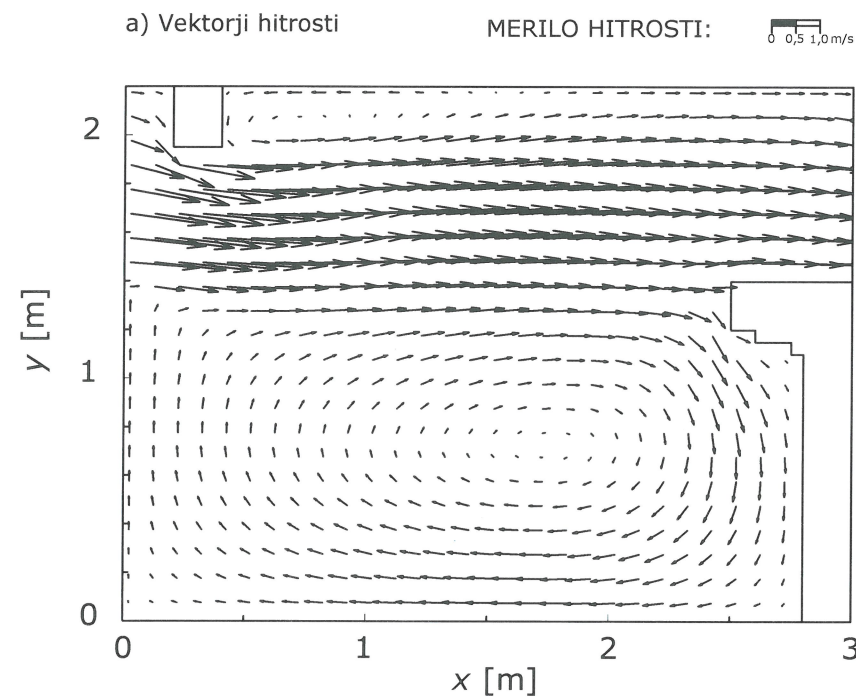
PRILOGA C: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA RIBJE STEZE BLANCA

Priloga C.3: Izračunane in izmerjene vrednosti komponent hitrosti u in v v prečnih prerezih $x = 0,6, 1,2, 1,8$ and $2,3$ m.

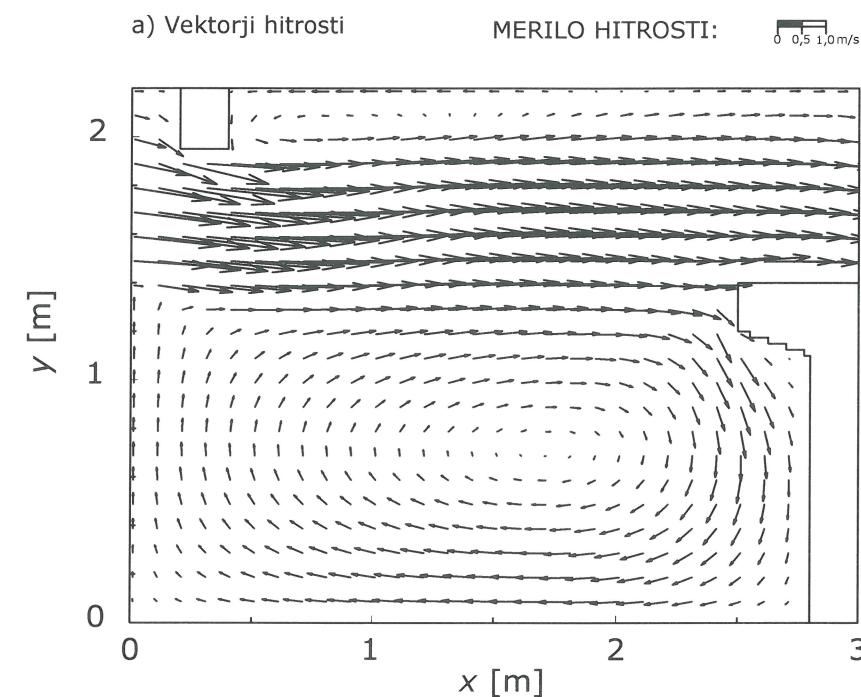
$k - \varepsilon$ MODEL TURBULENCE



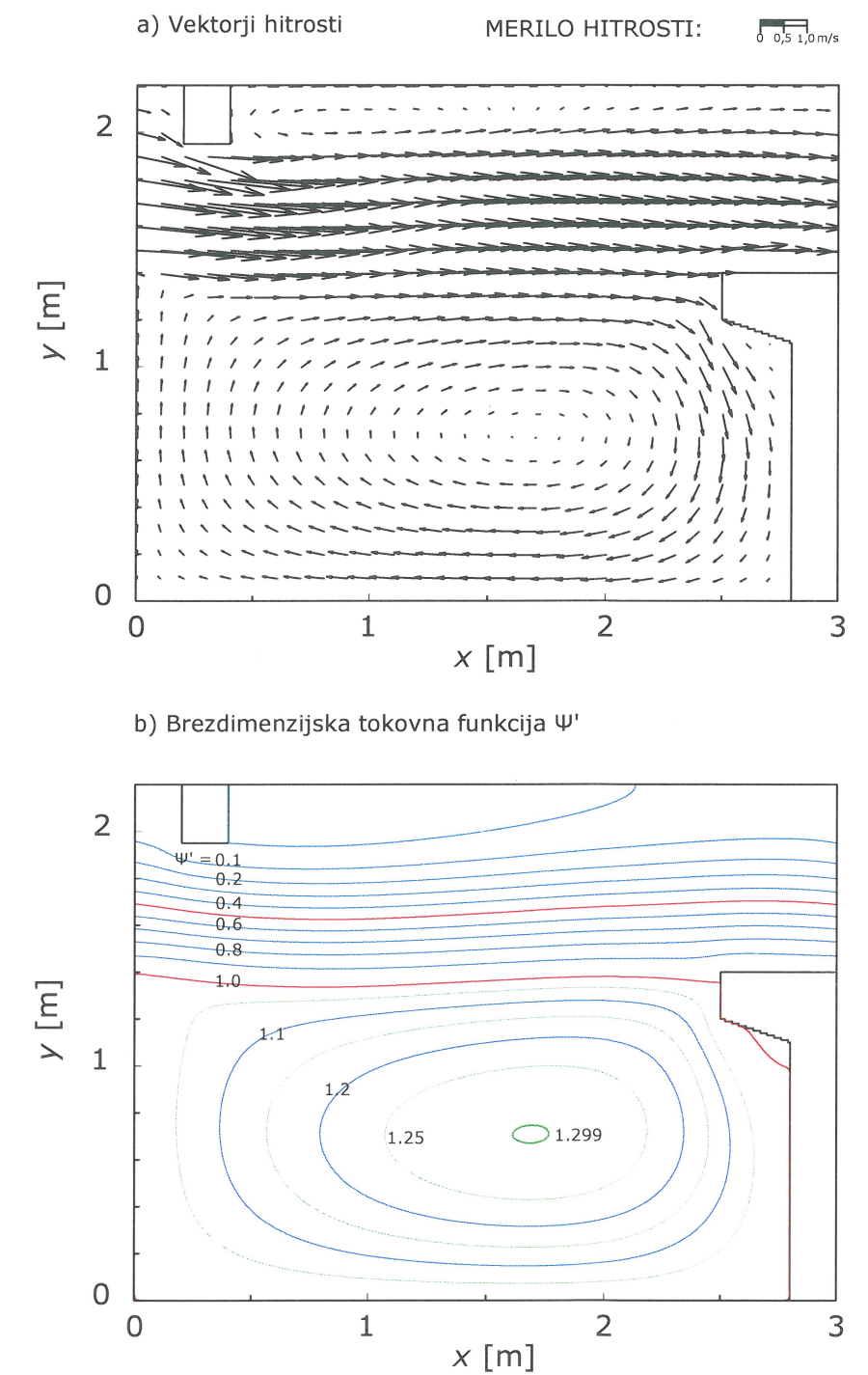
numerična mreža 620 x 46 (celice 5 x 5 cm);
hibridna shema; $\Delta T = 0,1$ s;
model konstantne efektivne viskoznosti; $\nu_t = 0,008613$ m²/s



numerična mreža 1238 x 90 (celice 2,5 x 2,5 cm);
hibridna shema; $\Delta T = 0,1$ s;
model konstantne efektivne viskoznosti; $\nu_t = 0,007924$ m²/s

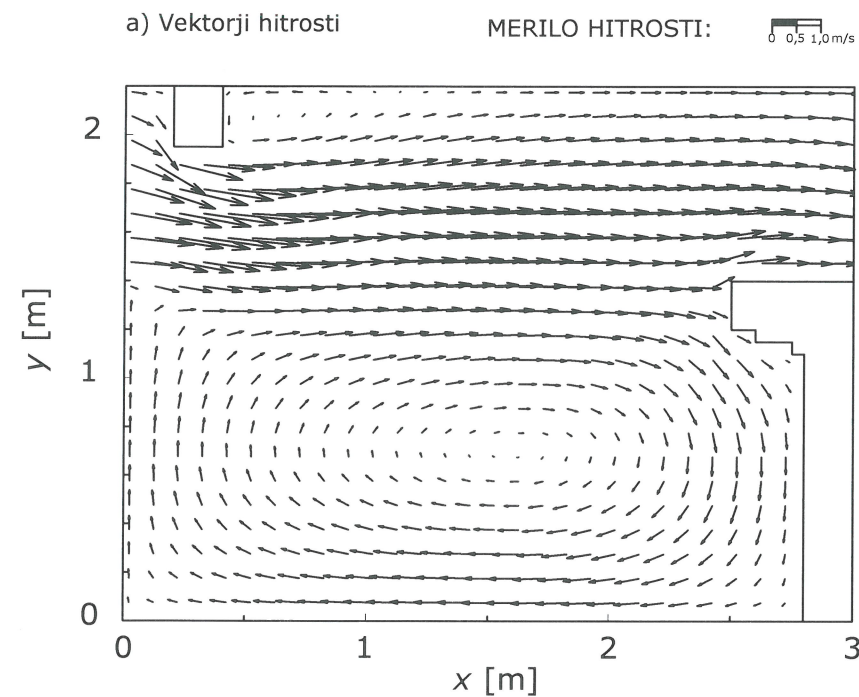


numerična mreža 1116 x 222 (celice 1 x 1 cm);
hibridna shema; $\Delta T = 0,1$ s;
model konstantne efektivne viskoznosti; $\nu_t = 0,007324$ m²/s

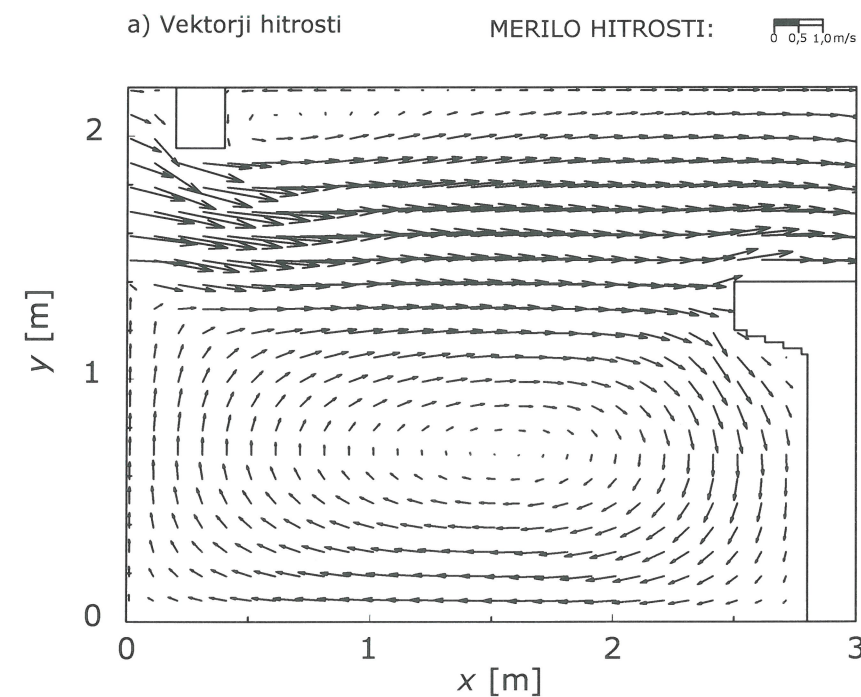


PRILOGA C: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA RIBJE STEZE BLANCA
Priloga C.4: Tok vode v srednjem prekatu ribje steze. Model konstantne efektivne viskoznosti.

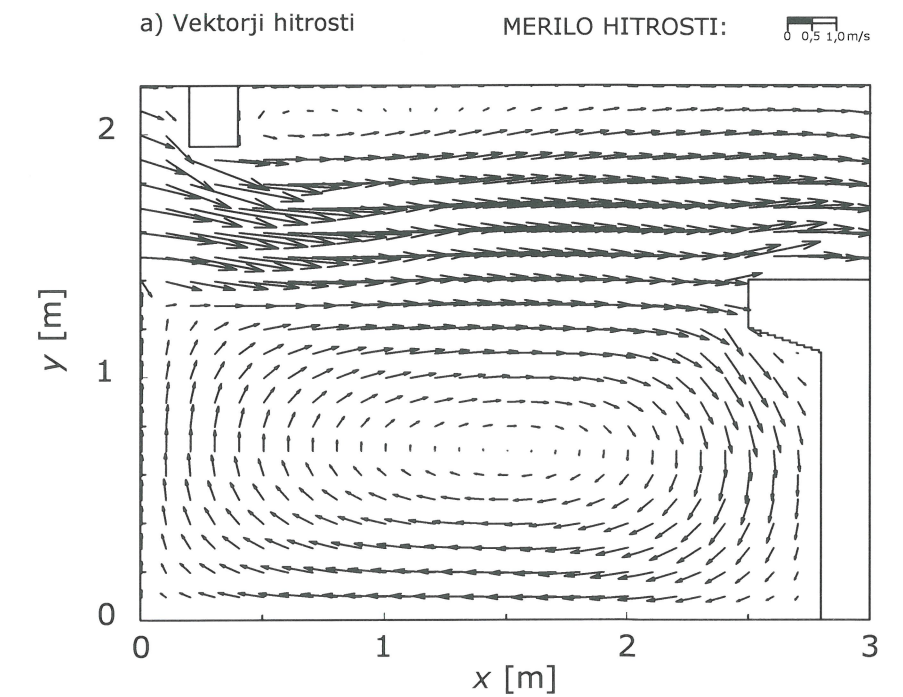
numerična mreža 620 x 46 (celice 5 x 5 cm);
hibridna shema; $\Delta T = 0,1$ s;
model Smagorinsky; $C_s = 1,94$



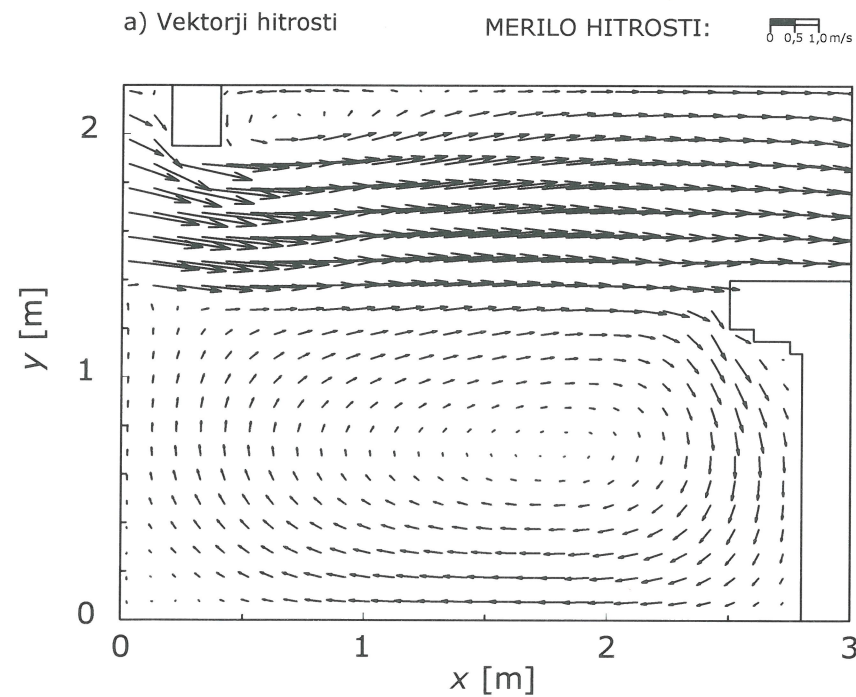
numerična mreža 1238 x 90 (celice 2,5 x 2,5 cm);
hibridna shema; $\Delta T = 0,1$ s;
model Smagorinsky; $C_s = 3,44$



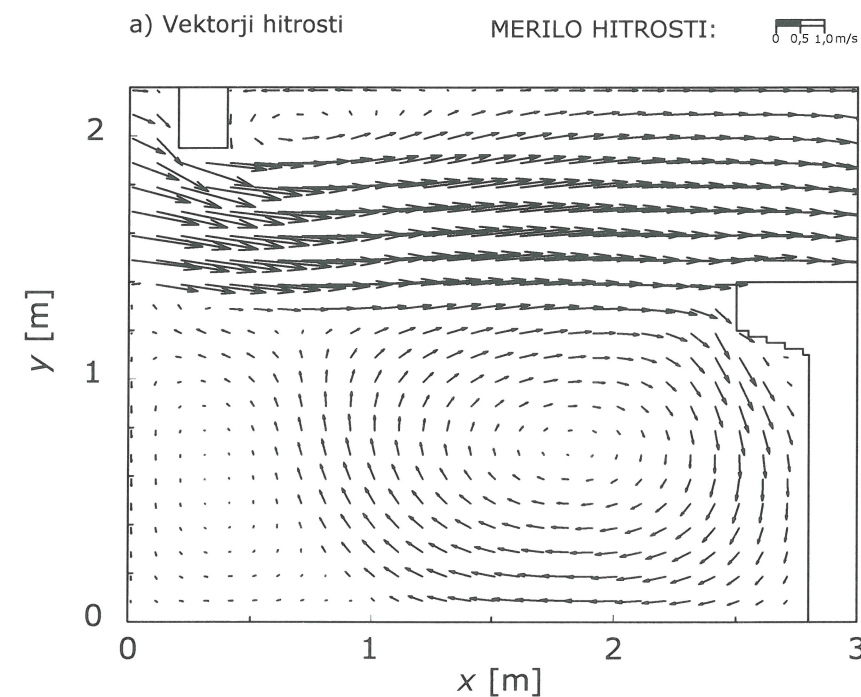
numerična mreža 1116 x 222 (celice 1 x 1 cm);
hibridna shema; $\Delta T = 0,1$ s;
model Smagorinsky; $C_s = 7,32$



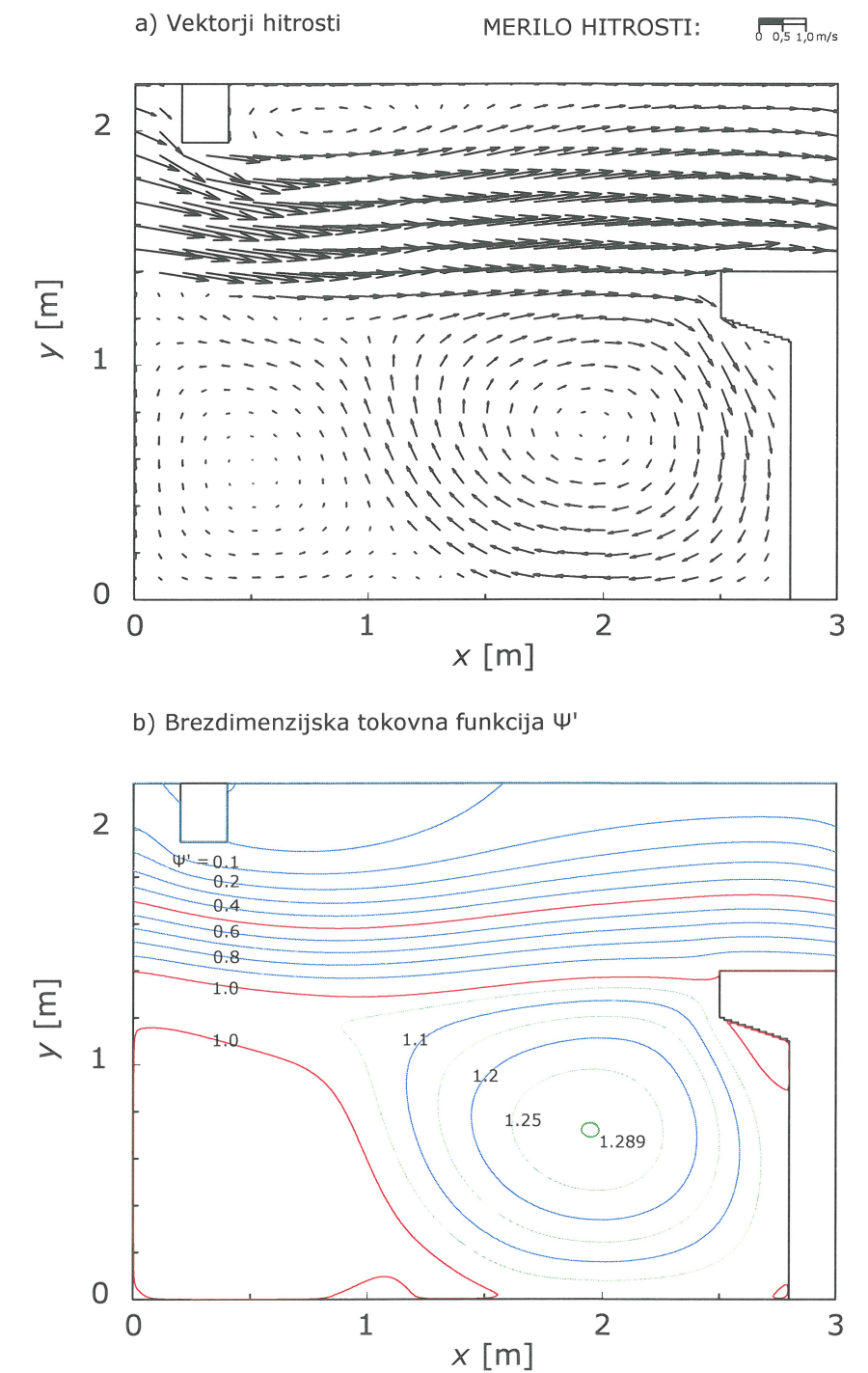
numerična mreža 620 x 46 (celice 5 x 5 cm);
hibridna shema; $\Delta T = 0,1$ s;
 $k - \varepsilon$ model turbulence



numerična mreža 1238 x 90 (celice 2,5 x 2,5 cm);
hibridna shema; $\Delta T = 0,1$ s;
 $k - \varepsilon$ model turbulence



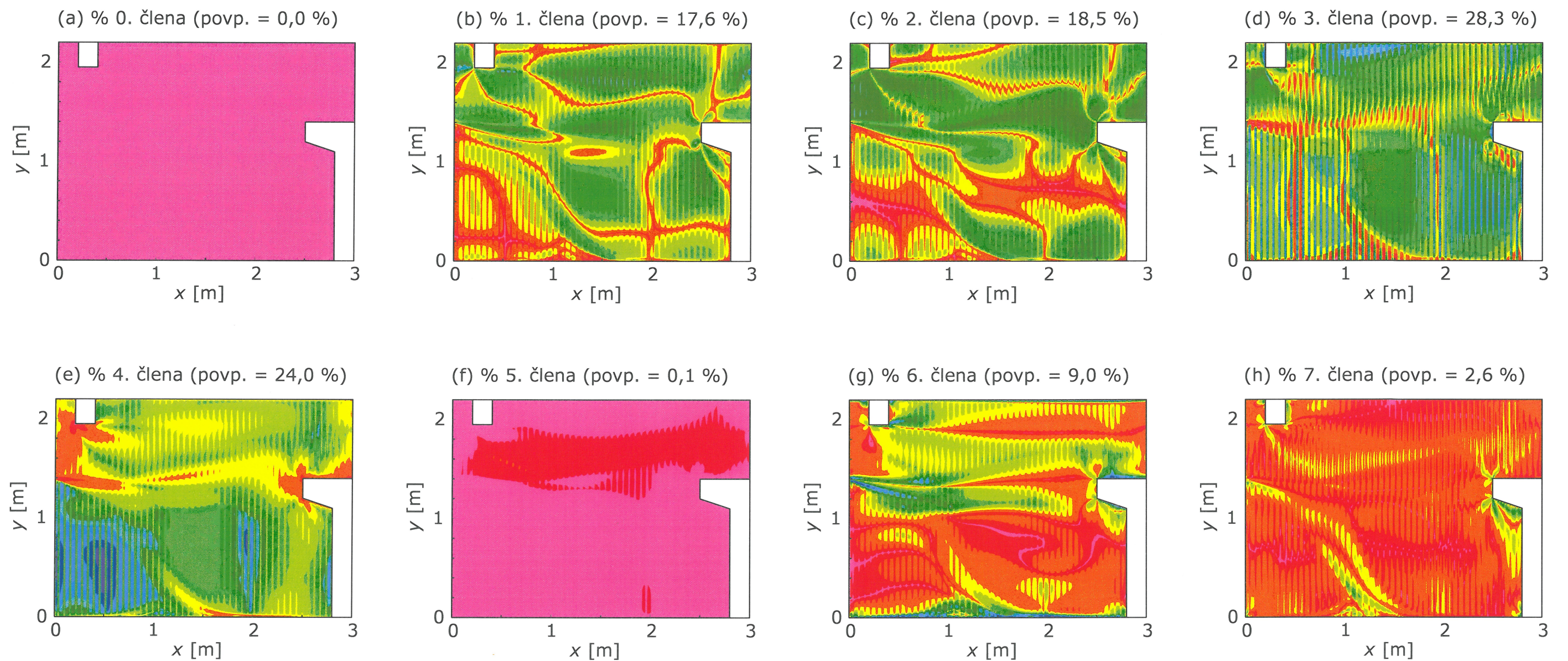
numerična mreža 1116 x 222 (celice 1 x 1 cm);
hibridna shema; $\Delta T = 0,1$ s;
 $k - \varepsilon$ model turbulence



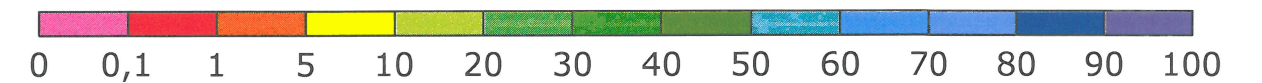
Dinamična enačba za x smer (približno v smeri toka)

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - gh n_g^2 \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h \nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \nu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen



delež posameznega člena v dinamični enačbi [%]

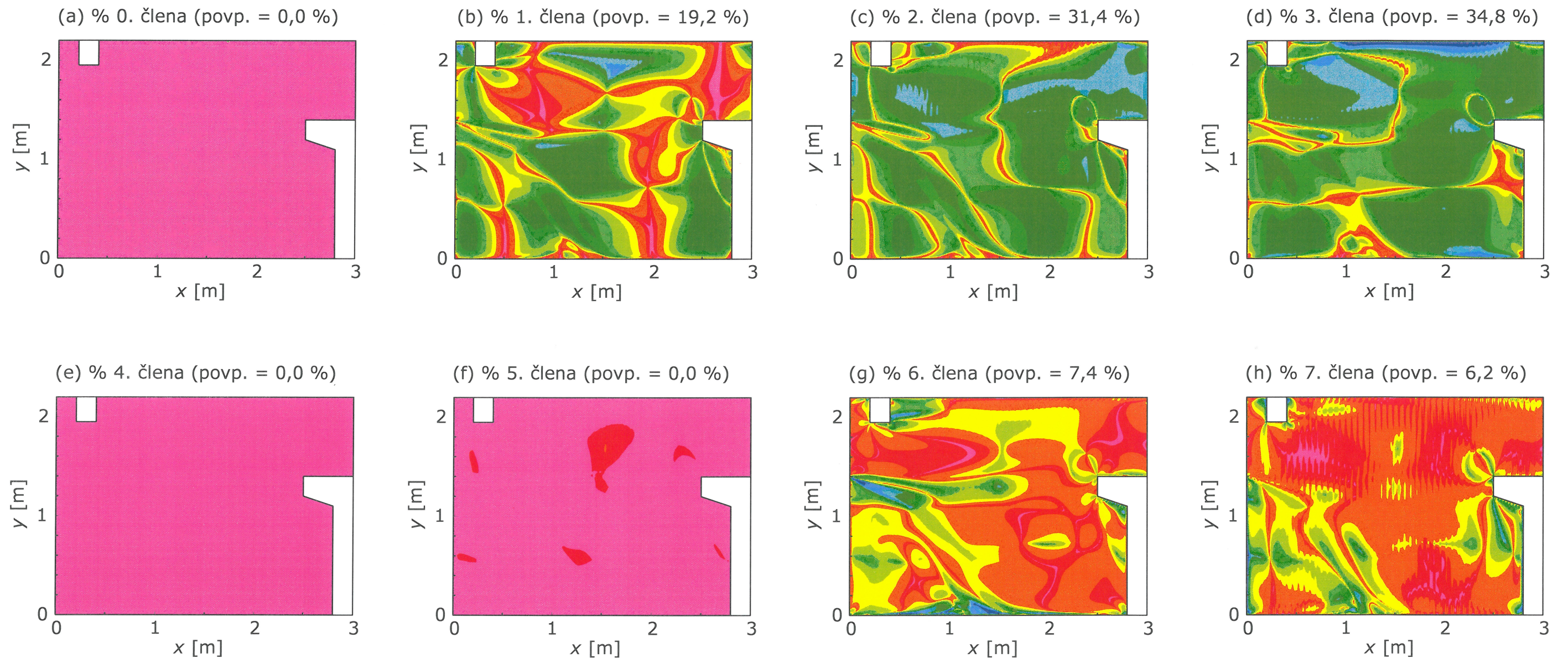


PRILOGA C: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA RIBJE STEZE BLANCA
Priloga C.7: Vpliv posameznih členov v dinamični enačbi (smer x) v karakterističnem srednjem prekatu ribje steze po 1 uri simulacije. $k - \epsilon$ model turbulence.

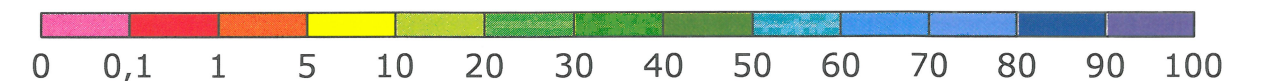
Dinamična enačba za y smer (približno pravokotno na tok)

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - gh m_g^2 \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h v_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h v_t \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

0. člen 1. člen 2. člen 3. člen 4. člen 5. člen 6. člen 7. člen



delež posameznega člena v dinamični enačbi [%]



PRILOGA C: REZULTATI MATEMATIČNEGA MODELA RIBJE STEZE BLANCA
Priloga C.8: Vpliv posameznih členov v dinamični enačbi (smer y) v karakterističnem srednjem prekatu ribje steze po 1 uri simulacije. $k - \varepsilon$ model turbulence.